



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**Trabajo de Fin de Grado**

Dimensionado básico asistido por  
ordenador de máquinas eléctricas.  
Aplicación a máquinas síncronas de rotor  
liso

*Realizado por:* Jorge Espejo-Saavedra García

*Tutor:* Dr. Javier Sanz Feito

*Titulación:* Grado en Ingeniería Eléctrica

*Madrid, Junio de 2017*



A mis padres,  
por su apoyo incondicional

*“Cuando podemos medir aquello de lo que hablamos  
y expresarlo en cifras, sabemos algo de ello;  
cuando no podemos medirlo ni expresarlo en cifras,  
nuestro saber es débil e insatisfactorio;  
quizá sea el comienzo, pero apenas cabe decir que  
hayamos llegado al estado científico”*

Lord Kelvin



## **Abstract**

In this final project a tool will be developed in the Mathcad environment to be used as an auxiliary instrument for the calculation of rotating electrical machines, specifically for non-salient pole rotor synchronous machines, using classical analytical equations from electrical machines calculus, to facilitate a basic electrical design. There are neither finite element simulations, nor a detailed specific project on the thermal or mechanical aspects. The program is thought to be applied to the calculation of a cylindrical pole rotor synchronous machine, as a test case.

## Tabla de contenido

1.1 Introducción.....	1
1.1 Entorno Mathcad.....	1
1.2 Planteamiento del problema y estado del arte .....	1
1.3 La máquina síncrona .....	2
2. Caso de prueba .....	4
3. Volumen prismático .....	6
3.1 Coeficiente de utilización .....	6
3.2 Determinación de $B_m$ y $A_\mu$ .....	6
4. Cálculo del devanado inducido.....	10
4.1 Longitud y diámetro del estator .....	10
4.2 Ancho de ranuras y dientes del estator .....	11
4.3 Dimensionado de los conductores del estator.....	14
4.4 Profundidad de las ranuras.....	19
5. Factor de devanado .....	21
5.1 Factor de paso $K_p$ .....	21
5.2 Factor de distribución $K_d$ .....	22
5.3 Factor de devanado $K_w$ .....	23
6. Flujo magnético .....	24
7. Resistencia del estator .....	25
8. Determinación del entrehierro .....	28
8.1 Reactancia síncrona $X_s$ .....	28
8.2 Reactancia de dispersión $X_\sigma$ .....	29
8.3 Entrehierro geométrico .....	30
8.4 Factor de Carter $K_{c1}$ .....	30
9. Cálculo geométrico del devanado inductor .....	32
9.1 Diámetro del rotor.....	32
9.2 Ranuras y dientes del rotor .....	32
9.3 Factor de Carter $K_{c2}$ y entrehierro efectivo $g_0$ .....	33
10. Corriente de excitación.....	34
10.1 Corriente de excitación en vacío.....	34
10.2 Corriente de excitación a plena carga .....	35
11. Resistencia del devanado de excitación.....	38
12. Conductores del rotor .....	39

12.1 Longitud de los conductores .....	39
12.2 Dimensionado de los conductores .....	41
13. Profundidad de las ranuras del rotor.....	45
14. Pérdidas de potencia y rendimiento.....	46
14.1 Pérdidas en el hierro .....	46
14.2 Pérdidas en el cobre .....	48
14.3 Pérdidas mecánicas .....	48
14.4 Rendimiento de la máquina .....	49
16. Solución del problema y conclusiones .....	50
16.1 Estator .....	51
16.2 Entrehierro .....	53
16.3 Rotor .....	53
17. Listado de variables .....	55
18. Valoración económica del proyecto .....	60
19. Bibliografía.....	62

# **1. Introducción**

## **1.1 Entorno Mathcad**

Se pretende realizar una herramienta auxiliar para el cálculo del dimensionado básico de turbo alternadores, para el desarrollo de las ecuaciones he escogido Mathcad como entorno.

La elección del entorno Mathcad frente a otros es porque resulta en una interfaz más amigable ya que el usuario podrá interactuar con las variables y seguir el proceso de cálculo empleado en el diseño con facilidad debido a la sencilla comprensión del lenguaje utilizado, incluso podrá modificar su código.

Otra de la ventajas de este entorno es la facilidad de la integración de texto intercalado con el código sin alterarlo, por ello se ha optado por redactar la memoria completa con Mathcad. También existen algunas limitaciones en Mathcad en lo que a edición de texto se refiere ya que no disponemos de herramientas como anotaciones a pie de página, o edición de sangrado y márgenes entre otras.

## **1.2 Planteamiento del problema y estado del arte**

El diseño de una máquina eléctrica es un proceso muy laborioso que implica una compleja solución iterativa de ecuaciones diferenciales no lineales, tablas de datos, relaciones empíricas e información de costes. Diseñar una máquina sincrónica, en particular, no es precisamente un cálculo simple debido a la multitud de variables implicadas en el proceso, esto es en parte, debido a que la salida de la máquina no está relacionada con los parámetros de entrada del sistema únicamente a través de expresiones analíticas. Esto quiere decir que valores de salida como potencia voltaje e intensidad entre otros no están relacionados de manera lineal con parámetros de entrada tales como la geometría de la máquina, materiales utilizados etc. Por tanto, se trata de un diseño iterativo, si el diseño no alcanzó el rendimiento deseado o especificado, todo el proceso tendría que repetirse. *Véase referencia [1]*

Los diferentes métodos de diseño de máquinas eléctricas contemporáneas están basados en el diseño asistido por ordenador (CAD), e implican la definición y representación del sistema, así como la especificación de los parámetros de la máquina y la selección del procedimiento de solución. En este trabajo se intenta dar una solución posible al dimensionado basado en las ecuaciones básicas de análisis en forma de expresiones analíticas, que sirva de ayuda para agilizar este proceso de una manera orientativa.

El diseño de máquinas eléctricas es en gran parte un proceso subjetivo basado en la experiencia del ingeniero de diseño. Para cualquier conjunto dado de especificaciones de rendimiento y parámetros de salida, un número casi infinito de diseños son capaces de cumplir con el conjunto de especificaciones. Si se consideran

los factores económicos y de fiabilidad, entonces el conjunto de diseños factibles disminuye, pero sigue siendo un valor muy elevado.

En este Trabajo Fin de Grado se pretende desarrollar una herramienta software en un entorno Mathcad para su uso como instrumento auxiliar en el cálculo de máquinas eléctricas rotativas, en concreto máquinas síncronas de rotor liso, mediante la utilización de las ecuaciones analíticas clásicas de cálculo de máquinas eléctricas, para facilitar un diseño eléctrico básico. No se incluye ni una simulación por elementos finitos, ni un proyecto específico detallado de los aspectos térmicos ni mecánicos.

El programa se aplicará al cálculo de un generador síncrono de rotor cilíndrico, que servirá como caso de prueba. El proceso de cálculo implica normalmente el uso de iteraciones, aproximaciones sucesivas u operaciones de "ensayo-y-error" ya que para unos parámetros de entrada dados (electromagnéticos, mecánicos etc.) existen varias soluciones que puedan satisfacer unas necesidades de rendimiento, proyecto económico y de fiabilidad, esto es debido a factores como:

- Materiales magnéticos, conductores y aislantes utilizados.
- Diversidad en los numerosos procesos de fabricación.
- Los distintos tipos y disposiciones de bobinas del inducido.
- La naturaleza multivariable general del proceso de diseño.

Todas las operaciones que afectan al problema, o gran parte de ellas son susceptibles de ser automatizadas mediante un código software, que facilite el desarrollo de los cálculos y sirva de guía, permitiendo al diseñador centrarse en el propio proceso de diseño y elección de parámetros.

### **1.3 La máquina síncrona**

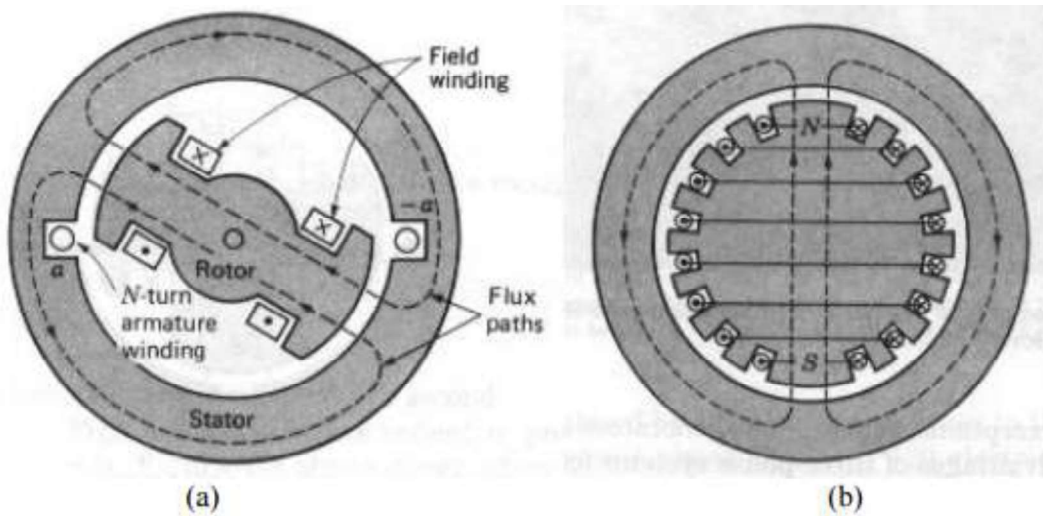
Las máquinas eléctricas son usadas casi en su totalidad en la producción de energía eléctrica, existen pocos procesos de producción de energía donde no sean usadas máquinas rotativas, en dichos procesos se utilizan éstas al menos como motores auxiliares. Alrededor de la mitad de la energía eléctrica creada en el mundo es usada en motores eléctricos. *Véase referencia [2]*

Una máquina se clasifica como "síncrona" si en condiciones normales opera a una velocidad fija. La velocidad de funcionamiento de este tipo de máquinas se conoce como la velocidad síncrona y mantiene una relación constante con la frecuencia de excitación (giro de la turbina) y con la frecuencia de salida .

Las máquinas síncronas se utilizan comúnmente como generadores en centrales eléctricas especialmente para potencias elevadas, como un generador girando en el eje de una turbina de gas o en el uso de generadores hidroeléctricos. También son

utilizados a menudo en sistemas aislados o instalaciones (grupos electrógenos) de emergencia como hospitales donde el generador es accionado con un motor de combustión, en esta aplicación la gama de potencias es mucho menor.

Las máquinas síncronas tienen una mayor diversidad de configuraciones físicas que cualquier otra clase de máquina giratoria. En general, las máquinas síncronas se denominan con frecuencia alternadores, en términos de tamaño físico y potencia, los alternadores representan la clase más grande de dispositivos eléctricos rotatorios existentes. Más del 90% de la energía eléctrica utilizada en el mundo es generada por alternadores. Véase referencia [1]



*Ilustración 1. Rotor de polos salientes (a), y rotor cilíndrico(b).*

La máquina síncrona consta de dos partes: devanado de inducido y devanado inductor. El devanado de inducido se encuentra alojado en las ranuras del estator (parte inmóvil de la máquina) y suele tratarse de un devanado trifásico. El devanado inductor (parte móvil) se encuentra en el rotor excitado por corriente continua mediante un generador de corriente alterna y un rectificador comúnmente alojado en el mismo eje de la máquina o mediante un motor de imanes permanentes. Existen dos tipos de estructuras de rotor, rotor cilíndrico (b) (alternadores de turbinas), y rotor de polos salientes (a) (hidroeléctricos).

Si la máquina funciona como generador, con  $p$  pares de polos, al hacer girar el rotor a una velocidad  $n$  ( $rpm$ ) se induce una tensión en cada bobina del estator constituyendo un sistema trifásico, de frecuencia  $f$ , dada por:  $f=np/60$  ( $Hz$ ) y de valor eficaz  $E=4,44k_w f N_s \Phi_m$  ( $V$ ).

Si la máquina funciona como motor, es necesario alimentar los devanados del estator con tensiones alternas trifásicas de frecuencia  $f$  ( $Hz$ ) resultando que el motor gira a una velocidad  $n$  ( $rpm$ ) dada por  $n=60f/p$  ( $rpm$ ). Esta velocidad coincide con la de giro del campo magnético creado por los devanados del estator. Véase referencia [3]

## 2. Caso de prueba

Antes de comenzar, debemos indicarle a Mathcad como debe entender las unidades eléctricas que no tiene en su base de datos, como el voltio-amperio (VA), ya que a la hora de hablar de potencia eléctrica si utiliza la unidad de vatios (W), pero no la de voltio-amperio.

$$VA := V \cdot A \quad KVA := 1000 \cdot VA \quad MVA := 1000 KVA$$

Partiremos de los siguientes datos para nuestro estudio, en el cual se ha escogido una máquina de 100MVA con valores típicos para esta potencia:

- Potencia asignada  $S_n := 100 MVA$
- Tensión asignada  $U_n := 20 kV$
- Frecuencia  $f := 50 Hz$
- Factor de potencia  $\cos \varphi := 0.8$
- Velocidad de giro  $\Omega_I := 3000 rpm$
- Relación de cortocircuito  $SCR := 0.7$
- Tensión de excitación  $V_{exc} := 450 V$
- Conexión Y
- Aislamiento Clase F  $T_{trabajo} := 130 ^\circ C$
- Refrigeración H<sub>2</sub> indirecta

Se puede apreciar que aún siendo la clase de aislamiento F, hemos supuesto que el generador trabajará como aislamiento B, a una temperatura de 130°C. Con ello aseguraremos que nunca sobrepasará el límite de la clase de aislamiento F que son 155°C, lo cual alarga la vida útil de los mismos, ya que para la mayoría de los materiales aislantes se acepta como válida la ley de Monstinger la cual postula que por cada incremento de 8-10°C en la temperatura la vida útil se divide por dos.

Véase referencia [4]

De manera inmediata a partir de los datos iniciales podemos deducir lo siguiente:

- **Corriente nominal:**

$$I_n := \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = 2886.751 A$$

- **Potencia activa nominal:**

$$P_n := \cos\varphi \cdot S_n = 8 \times 10^4 \cdot kW$$

- **Par interno de la máquina**

$$T_m := \frac{S_n}{\Omega_I} = 318.31 \cdot kN \cdot m$$

También podemos deducir el número de pares de polos  $p$  a partir de la velocidad de sincronismo ya que para la frecuencia de 50Hz existen las siguientes posibilidades:

- 3000rpm=2 polos
- 1500rpm=4 polos
- 500rpm=6 polos

Y así sucesivamente, luego  $p$ :

$$p := \frac{f}{\left( \frac{\Omega_I}{2 \cdot \pi} \right)} = 1$$

En esta expresión la velocidad de sincronismo  $\Omega_I$  esta expresada en radianes por segundo.

Por último dejaremos definida la impedancia base  $Z_b$  que nos será de utilidad para nuestro problema.

$$Z_b := \frac{U_n^2}{S_n} = 4 \cdot \Omega$$



### 3. Volumen prismático de la máquina

#### 3.1 Coeficiente de utilización $C_0$

Para dar un primer valor aproximado de como de grande será nuestra máquina utilizaremos el coeficiente de utilización  $C_0$ , el cual define una relación entre el tamaño de una máquina y sus parámetros eléctricos:

$$S = \Omega_1 T = \Omega_1 C_0 D^2 L$$

El tamaño de una máquina es básicamente proporcional al par de la misma y no a la potencia. El coeficiente de utilización o coeficiente de Esson,  $C_0$ , viene dado en la caso de una máquina síncrona por la siguiente expresión:

$$C_0 = \frac{\pi A_\mu B_m}{2\sqrt{2}}$$

Donde  $A_\mu$  es el valor eficaz de la capa de corriente en el inducido en A/m y  $B_m$  la densidad de flujo máxima (sinusoidal) en el entrehierro en T.

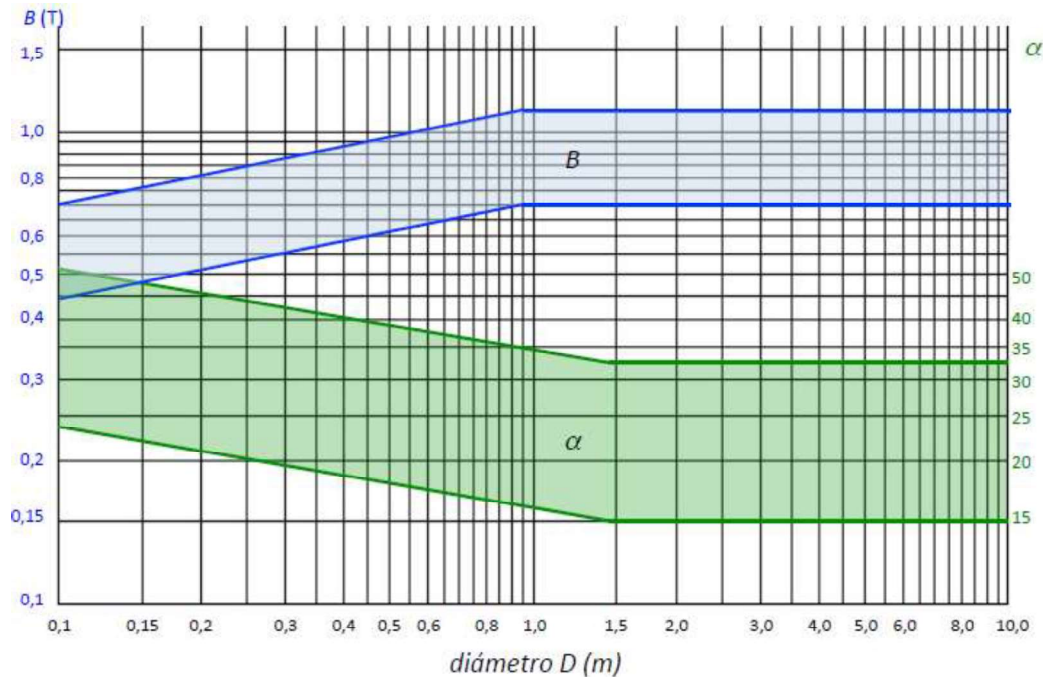
#### 3.2 Determinación de $B_m$ y $A_\mu$

Nos apoyaremos en la siguiente tabla como referencia para definir los valores preliminares que tendrán  $A_\mu$  y  $B_m$ . Véase referencia [2]

	Máquinas síncronas				Máq. asíncronas
$B_m$ (T)	0,8 – 1,05				0,4 – 0,65
$A_\mu$ (A/mm)	Refrigeración indirecta		Refrigeración directa		
	Aire	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Agua	
	30 - 120	90 - 150	120 - 200	160 - 300	20 - 120
$\delta$ (A/mm <sup>2</sup> )	Devanados de inducido				
	3 - 7	4 - 8	5 - 10	13 - 18	3 - 8 (estator)
	Devanados de excitación				3 - 8 (rotor Cu)
	3 - 7 (rotor liso)	6 - 15		13 - 18	3 - 6 (rotor Al)
	2 - 4 (polos sal.)				

Tabla 1. Valores típicos  $B_m$ ,  $A_\mu$  y  $\delta$ .

Los valores mayores corresponden a potencias mayores. Para una determinación mas realista de dichos parámetros nos apoyaremos en estudios estadísticos los cuales recogen valores de varias máquinas y establecen un modelo para la evolución de algunos parámetros como  $A_\mu$  y  $B_m$  en función de su diámetro.



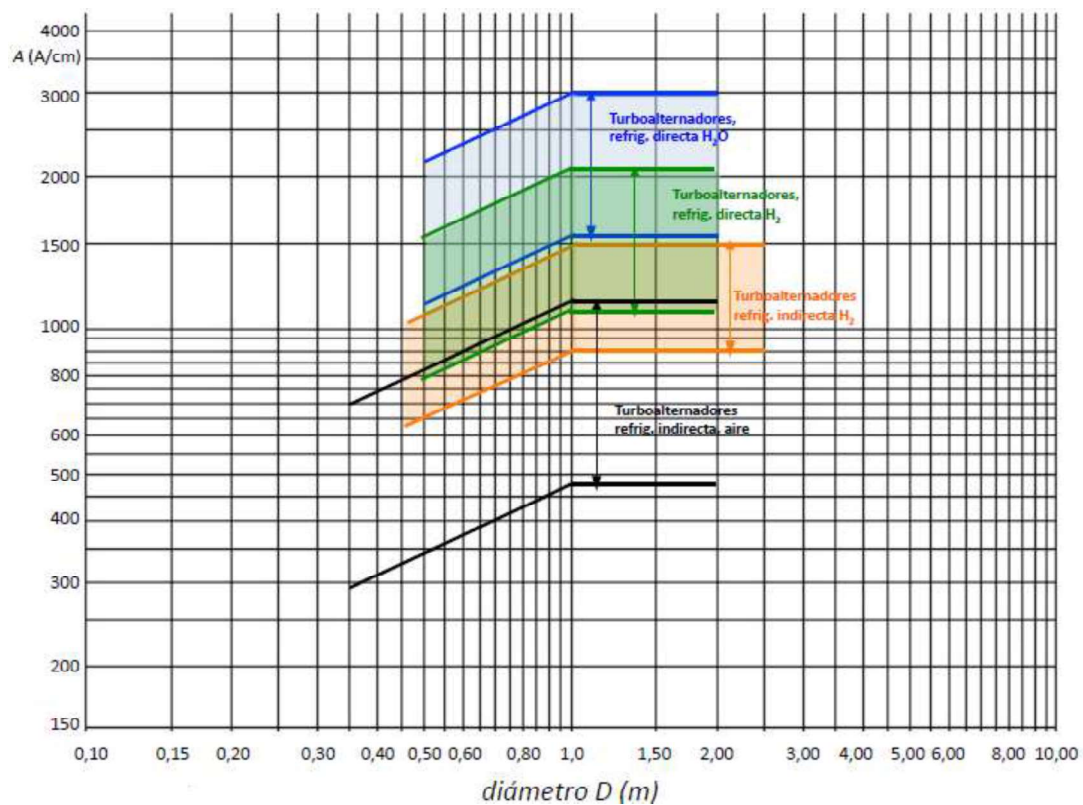
*Gráfica 1. Evolución de  $B_m$  en función del diámetro.*

A la hora de escoger un parámetro  $B_m$  coherente necesitaremos realizar una estimación del diámetro de nuestra máquina. Como primera hipótesis fijaremos un diámetro máximo como consideración de tipo mecánico, procurando que la velocidad periférica del rotor no supere los  $170m/s$  a la velocidad de sincronismo  $\Omega_I$ .

$$D_{max} := 2 \cdot \frac{170 \frac{m}{s}}{\Omega_I} = 1.082 m$$

En mi caso de estudio ( $100MVA$ ) me encuentro con una máquina que no resulta ser de gran potencia lo cual también nos orientará a la hora de estimar un valor para la densidad de flujo máxima en el entrehierro  $B_m$ . Con esta información ya somos capaces de dar un primer valor a  $B_m$  (que posteriormente será calculado con exactitud).

$$B_m := 0.9T$$



Gráfica 2. Evolución de  $A_\mu$  en función del diámetro.

	Asynchronous machines	Sailent-pole synchronous machines or PMSMs	Nonsalient-pole synchronous machines			DC machines
			Indirect cooling		Direct water cooling	
			Air	Hydrogen		
$A/\text{kA/m}$	30–65	35–65	30–80	90–110	150–200	25–65
	Stator winding	Armature winding		Armature winding		Armature winding
$J/\text{A/mm}^2$	3–8	4–6.5	3–5	4–6	7–10	4–9
	Copper rotor winding	Field winding:				Pole winding
$J/\text{A/mm}^2$	3–8	2–3.5				2–5.5
	Aluminium rotor winding	Multi-layer		Field winding		Compensating winding
$J/\text{A/mm}^2$	3–6.5	2–4	3–5	3–5	6–12	3–4
		Single-layer	With direct water cooling, in field windings $13\text{--}18\text{ A/mm}^2$ and $250\text{--}300\text{ kA/m}$ can be reached			

Tabla 2. Valores de  $A_\mu$  en función de la refrigeración.

En función de la refrigeración de nuestra máquina debemos establecer un valor de la capa de corriente en el inducido (podemos apoyarnos en las *tablas 1 y 2*). Véase referencia [1]

$$A_{\mu} := 900 \frac{A}{cm}$$

Con estos datos ya podemos hallar el coeficiente de utilización  $C_0$  que relaciona los parámetros eléctricos de la máquina con su tamaño:

$$C_0 := \frac{\pi \cdot A_{\mu} \cdot B_m}{2\sqrt{2}} = 8.997 \times 10^4 \cdot \frac{A \cdot T}{m}$$

El volumen prismático de la máquina será ( $D^2L$ ):

$$V_{pris} := \frac{S_n}{\Omega_I \cdot C_0} = 3.538 \cdot m^3$$

## 4. Cálculo geométrico del devanado inducido

### 4.1 Longitud y diámetro del estator

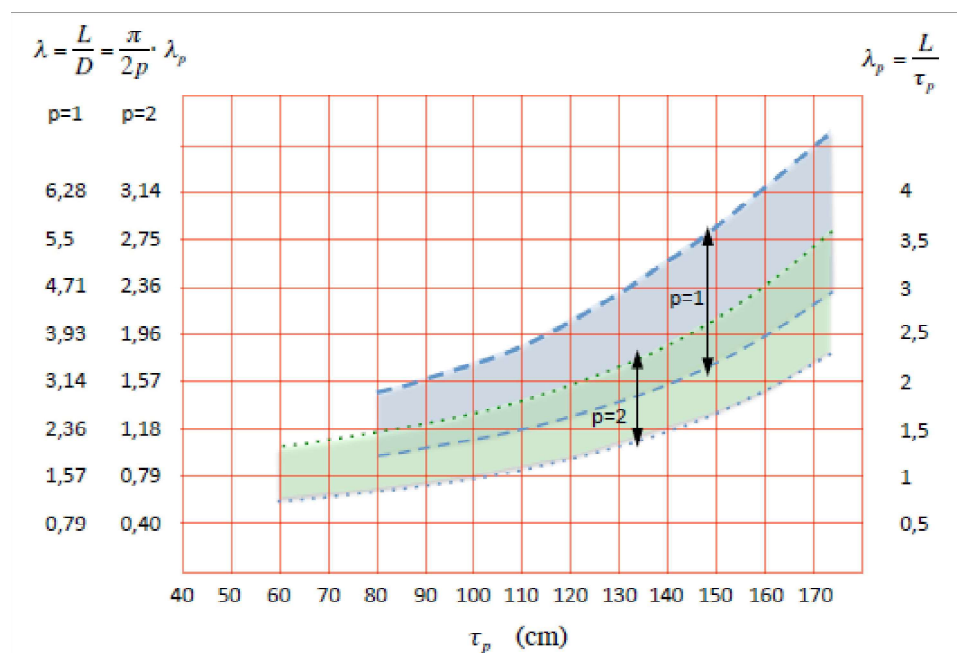
Partiremos de la relación de esbeltez de polo  $\lambda_p$  :

$$\lambda_p = \frac{L}{\tau_p}$$

A partir de esta expresión lo que haremos será empezar dando un valor a la longitud de la máquina  $L$  , con el que podremos deducir un valor para  $\lambda_p$  y el diámetro de nuestra máquina  $D$  mediante las siguientes expresiones:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \quad D = \sqrt{\frac{V_{pris}}{L}}$$

A la hora de tomar valores para  $L$  debemos comprobar que los valores obtenidos de  $\lambda_p$  y  $\tau_p$  sean razonables, para ello nos apoyaremos en la siguiente gráfica que recoge datos de máquinas reales que nos sirven de referencia .



Gráfica 3. Evolución de  $\lambda$  y  $\lambda_p$  en función del paso polar.

También necesitaremos hallar el valor de la relación de esbeltez de rotor  $\lambda$  y comprobar que no salga de los límites razonables

Comenzaremos escogiendo la longitud del estator  $L_s$  , y a base de prueba y error ajustaremos las variables hasta que sea necesario:

$$L_s := 4m$$

$$D := \sqrt{\frac{V_{pris}}{L_s}} = 94.05 \cdot cm$$

$$\tau_p := \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 147.73 \cdot cm$$

$$\lambda_p := \frac{L_s}{\tau_p} = 2.708$$

$$\lambda := \frac{L_s}{D} = 4.253$$

## 4.2 Ancho de ranuras y dientes del estator

En este apartado dimensionaremos los ranuras y dientes del estator, para ello de nuevo nos apoyaremos en valores típicos para comenzar nuestro cálculo. El primer paso será dar un valor al número de ranuras por fase y por polo  $q$ .

En la gran mayoría de máquinas con estas características se suelen usar devanados fraccionarios (el número de ranuras por polo y fase  $q$  no es un número entero), sobre todo en máquinas cuyo número de ranuras por polo es pequeño. Esto se consigue poniendo un número diferente de ranuras de una misma fase en cada par de polos. Por ejemplo imaginemos que el número de ranuras de una misma fase debajo de un par de polos es de 4 ( $q=2$ ) y en el siguiente de 6 ( $q=3$ ), si el número total de pares de polos  $2p$  fuese par nos encontraríamos con que la mitad de pares de polos tienen dos ranuras por fase y polo ( $q=2$ ) y la otra mitad tres ( $q=3$ ), luego el número de ranuras por fase y polo total sería  $q=2,5$ , es decir tendríamos un devanado fraccionario. A efectos de la fuerza electromotriz y la fuerza magnetomotriz, la máquina se comporta como si tuviese 5 ranuras por fase y polo.

En este modelo por simplicidad me he limitado a escoger un devanado entero, en los cuales el número de ranuras por fase y polo  $q$  es un número entero.

$$q := 9$$

A partir de  $q$  hallaremos el número total de ranuras del estator, sabiendo que se trata de una máquina trifásica ( $N_m=3$ ) y conocido el número de polos  $2p$ .

$$N_m := 3$$

$$N_r := q \cdot 2 \cdot p \cdot N_m = 54$$

Los devanados del estator de este tipo de máquinas siguen una distribución de bobinas de paso acortado (en cada ranura se alojarán dos conductores) de una espira por bobina ( $N_{s.b}=1$ ), lo cual nos permite calcular el número de espiras en serie por fase  $N_s$ .

$$N_{s.b} := 1$$

$$N_s := \frac{N_{s.b} \cdot N_r}{N_m} = 18$$

Con estos datos y la longitud periférica interior del estator  $L_{perif}$  podremos determinar una longitud de ranura y una longitud de diente estableciendo una relación entre ancho de ranura y paso de ranura  $k_{\tau,s}$ .

$$L_{perif} := \pi \cdot D = 2954.6 \cdot mm$$

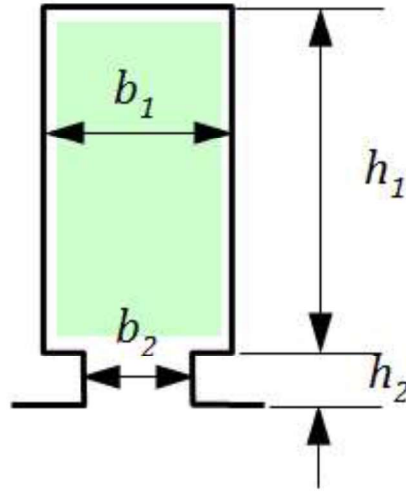
$$k_{\tau,s} := 0.5$$

Para el estudio supondremos  $k_{\tau,s}=0,5$ . Este número representa la fracción de paso de ranura que ocupa el ancho de ranura.

A partir de estos datos podremos hallar los valores de  $b_{r,s}$  y  $b_{d,s}$ , ancho de ranura y ancho de diente respectivamente, sabiendo que hay el mismo número de ranuras que de dientes.

$$b_{r,s} := \frac{L_{perif} \cdot k_{\tau,s}}{N_r} = 27.4 \cdot mm$$

$$b_{d,s} := \frac{L_{perif} - N_r \cdot b_{r,s}}{N_r} = 27.4 \cdot mm$$



*Ilustración 2. Sección de una ranura del estator.*

En el caso de las máquinas síncronas las pletinas (conductores) ocupan la totalidad del ancho de ranura y son introducidas después de la fabricación del estator con lo cual únicamente habrá un ancho de ranura y de diente ya que sino no se podrán introducir los conductores ( $b_1=b_2$ ).

$$b_{2,r.s} := b_{r.s} = 27.4 \cdot mm$$

$$b_{2,d.s} := b_{d.s} = 27.4 \cdot mm$$

Nuestro paso de ranura  $\tau_{r.s}$  en el estator será:

$$\tau_{r.s} := b_{r.s} + b_{d.s} = 54.7 \cdot mm$$

La siguiente tabla establece unos límites para el valor del paso de ranura en función del tipo de motor que nos servirán de apoyo en el modelo. Véase referencia 2

Machine type	Slot pitch, $\tau_s$ /mm
Asynchronous machines and small PMSMs	7–45
Synchronous machines and large PMSMS	14–75
DC machines	10–30

*Tabla 3. Valores típicos de paso de ranura..*

Para el caso de máquinas síncronas de potencia elevada nuestro valor debe estar comprendido entre 14 y 75 mm.



### 4.3 Dimensionado de los conductores del estator

Una vez hallados los anchos de ranura y diente, debemos conocer densidad de corriente de los conductores del estator para poder determinar el área que ocuparán los mismos, conocida la corriente que circula por ellos ( $I_n$ ).

De nuevo nos apoyaremos en la *tabla 1* (con la cual estimamos  $B_m$  y  $A_\mu$ ) para estimar un valor razonable de la densidad de corriente  $\delta_s$  de los conductores del estator.

	Máquinas sincronas				Máq. asincronas
$B_m$ (T)	0,8 – 1,05				0,4 – 0,65
$A_\mu$ (A/mm)	Refrigeración indirecta		Refrigeración directa		
	Aire	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Agua	
	30 - 120	90 – 150	120 – 200	160 – 300	20 - 120
$\delta$ (A/mm <sup>2</sup> )	Devanados de inducido				
	3 - 7	4 – 8	5 – 10	13 - 18	3 – 8 (estator)
	Devanados de excitación				3 – 8 (rotor Cu)
	3 - 7 (rotor liso)	6 – 15		13 - 18	3 – 6 (rotor Al)
	2 - 4 (polos sal.)				

*Tabla 1. Valores típicos  $B_m$ ,  $A_\mu$  y  $\delta$ .*

Como podemos observar para refrigeración de H<sub>2</sub> indirecta en el devanado estático (inducido), tenemos valores de 4 a 8 A/mm<sup>2</sup> que nos servirán de guía para nuestra elección, en nuestro caso se ha escogido el siguiente:

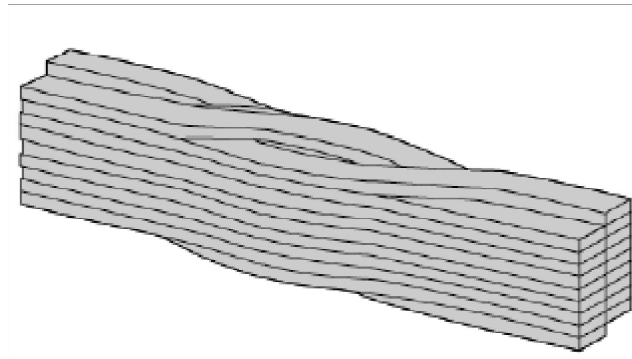
$$\delta_s := 6 \frac{A}{mm^2}$$

Con lo que obtendremos el área mínima de un conductor,

$$A_{cu.s.min} := \frac{I_n}{\delta_s} = 481.125 \cdot mm^2$$

Una vez obtenida el área de cobre necesaria para un conductor, debemos ver como formamos dicha área a partir de pletinas de cobre (conductores de sección rectangular) en paralelo ya que no se trata de un solo conductor que ocupe dicha área sino de varias pletinas.

La formación de los devanados se hace formando barras Roebel, en las cuales se emplea la trasposición de conductores (pletinas rectangulares) para uniformizar la exposición al flujo magnético que los atraviesan a diferentes alturas de la ranura (ver *ilustración 2*). Debido a su trasposición nos obliga a elegir un número par de pletinas.



*Ilustración 3. Trasposición de pletinas en barras Roebel.*

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN RECTANGULAR (Área en mm²)

Grosor (mm)	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	
Ancho (mm)																																
0,9	-	0,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,0	-	0,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,2	-	-	-	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,4	0,98	1,12	1,26	1,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,6	1,14	1,30	1,46	1,62	1,78	1,87	-	-	2,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,8	1,30	1,48	1,66	1,84	2,02	2,13	2,31	2,48	-	-	2,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2,0	1,46	1,66	1,86	2,06	2,19	2,39	2,59	2,79	2,99	3,19	-	-	3,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2,2	1,62	1,84	2,06	2,21	2,43	2,65	2,87	3,09	3,31	3,53	3,65	-	4,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2,5	1,86	2,11	2,36	2,54	2,79	3,04	3,29	3,54	3,79	4,04	4,19	4,44	4,69	-	5,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2,8	2,10	2,38	2,66	2,87	3,15	3,43	3,71	3,99	4,17	4,45	4,75	5,01	5,29	5,85	-	7,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,0	2,26	2,56	2,86	3,09	3,39	3,69	3,99	4,19	4,49	4,79	5,09	5,39	5,69	6,29	7,19	-	8,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,2	2,42	2,74	3,06	3,31	3,63	3,95	4,27	4,49	4,81	5,13	5,45	5,77	6,09	6,73	7,69	8,41	-	9,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,5	2,66	3,01	3,36	3,64	3,99	4,34	4,69	4,94	5,29	5,64	5,99	6,34	6,69	7,39	8,20	9,25	9,95	-	11,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,8	2,90	3,28	3,66	3,97	4,35	4,73	5,11	5,39	5,77	6,15	6,53	6,91	7,29	8,05	8,95	10,10	10,90	11,60	-	13,88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4,0	3,06	3,46	3,86	4,19	4,59	4,99	5,39	5,69	6,09	6,49	6,89	7,29	7,69	8,35	9,45	10,70	11,50	12,30	13,30	-	15,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4,5	3,46	3,91	4,36	4,74	5,19	5,64	6,09	6,44	6,89	7,34	7,79	8,24	8,45	9,35	10,70	12,10	13,00	13,90	15,20	-	17,10	19,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5,0	3,86	4,36	4,86	5,29	5,79	6,29	6,79	7,19	7,69	8,19	8,69	9,10	9,45	10,50	12,00	13,50	14,50	15,50	16,60	-	19,10	21,60	24,14	-	-	-	-	-	-	-	-	
5,5	4,26	4,81	5,36	5,84	6,39	6,94	7,49	7,94	8,49	9,09	9,59	10,10	10,50	11,60	13,20	14,90	16,00	17,00	18,40	-	21,10	23,85	26,60	29,30	-	-	-	-	-	-	-	
6,0	4,66	5,26	5,86	6,39	6,99	7,59	8,19	8,69	9,29	9,89	10,50	11,10	11,50	12,70	14,50	16,30	17,50	18,50	20,10	-	23,10	26,10	29,10	32,10	35,14	-	-	-	-	-	-	
6,5	5,06	5,71	6,36	6,94	7,59	8,24	8,89	9,44	10,10	10,70	11,40	12,00	12,50	13,80	15,70	17,70	19,00	19,90	21,90	-	25,10	28,40	31,60	34,90	38,10	41,40	-	-	-	-	-	
7,0	5,46	6,16	6,86	7,49	8,19	8,89	9,59	10,20	10,90	11,60	12,30	13,00	13,50	14,90	17,00	19,10	20,50	21,50	23,60	-	27,10	30,60	34,10	37,60	41,10	44,60	48,10	-	-	-	-	
7,5	5,86	6,61	7,36	8,04	8,79	9,54	10,30	10,90	11,70	12,40	13,20	13,90	14,50	16,00	18,20	20,50	22,00	23,10	25,40	-	29,10	32,90	36,60	40,40	44,10	47,90	51,60	55,40	-	-	-	
8,0	6,26	7,06	7,86	8,59	9,39	10,20	11,00	11,70	12,50	13,30	14,00	15,50	17,10	17,50	21,90	23,50	24,70	27,10	27,10	-	31,10	35,10	39,10	43,10	47,10	51,10	55,10	59,10	63,10	-	-	
9,0	7,06	7,96	8,86	9,69	10,60	11,50	12,40	13,20	14,10	15,00	15,90	16,80	17,50	19,30	22,00	24,70	26,50	27,90	30,60	-	35,10	39,60	44,10	48,60	53,10	57,60	62,10	66,60	71,10	80,10	-	
10,0	7,86	8,86	9,86	10,80	11,80	12,80	13,80	14,70	15,70	16,70	17,70	18,70	19,50	21,50	24,50	27,50	29,50	31,10	34,10	-	39,10	44,10	49,10	54,10	59,10	64,10	69,10	74,10	79,10	89,10	99,10	
11,0	8,66	9,76	10,90	11,90	13,00	14,10	15,20	16,20	17,30	18,40	19,50	20,60	21,50	23,70	27,00	30,30	32,50	34,30	37,60	-	43,10	48,60	54,10	59,60	65,10	70,60	76,10	81,60	87,10	98,10	109	
12,0	9,46	10,70	11,90	13,00	14,20	15,40	16,60	17,70	18,90	20,10	21,30	22,50	23,50	25,90	29,50	33,10	35,50	37,50	44,10	-	47,10	53,10	59,10	65,10	71,10	77,10	83,10	89,10	95,10	107	119	
13,0	10,30	11,60	12,90	14,10	15,40	16,70	18,00	19,20	20,50	21,80	23,10	24,40	25,50	28,10	32,00	35,90	38,50	40,70	44,60	-	51,10	57,60	64,10	70,60	77,10	83,60	90,10	96,60	103	116	129	
14,0	11,10	12,50	13,90	15,20	16,60	18,00	19,40	20,70	22,10	23,50	24,90	26,30	27,50	30,30	34,50	38,70	41,50	43,90	48,10	-	55,10	62,10	69,10	76,10	83,10	90,10	97,10	104	111	125	139	
15,0	11,90	13,40	14,90	16,30	17,80	19,30	20,80	22,20	23,70	25,20	26,70	28,20	29,50	32,50	37,00	41,50	44,50	47,10	51,60	-	59,10	66,60	74,10	81,60	89,10	96,60	104	112	119	134	149	
16,0	12,70	14,30	15,90	17,40	19,00	20,60	22,20	23,70	25,30	26,90	28,50	30,10	31,50	34,70	39,50	44,30	47,50	50,30	55,10	-	63,10	71,10	79,10	87,10	95,10	103	111	119	127	143	159	
18,0	-	16,10	17,90	19,60	21,40	23,20	25,00	26,70	28,50	30,30	32,10	33,90	35,50	39,10	44,50	49,90	53,50	56,70	62,10	-	71,10	80,10	89,10	98,10	107	116	125	134	143	161	179	
20,0	-	-	19,90	21,80	23,80	25,80	27,80	29,70	31,70	33,70	35,70	37,70	39,50	43,50	49,50	55,50	59,50	63,10	69,10	-	79,10	89,10	99,10	109	119	129	139	149	159	179	199	
22,0	-	-	-	24,00	26,00	28,40	30,60	32,70	34,90	37,10	39,30	41,50	43,50	47,90	54,50	61,10	65,50	69,10	76,10	-	87,10	98,10	109	120	131	142	153	164	175	197	219	
25,0	-	-	-	-	-	-	32,30	34,80	37,20	39,70	42,20	44,70	47,20	49,50	54,50	62,00	69,50	74,00	79,10	86,60	-	99,10	112	124	137	149	162	174	187	199	224	249

Subrayado: No aplicable cuando el aislante es algodón.

Doble subrayado: No aplicable cuando el aislante es algodón o papel.

Tabla 4. Sección real de conductores en función de las dimensiones de las pletinas.

Las pletinas no son de sección puramente rectangular sino que tienen los bordes redondeados, para tener en cuenta las dimensiones utilizadas de conductores rectangulares y su respectiva disminución de sección debido a los bordes redondeados atenderemos a la *tabla 4* para la elección de los mismos. Véase referencia [5]

Ahora debemos formar un área lo mas similar posible a nuestro área de cobre  $A_{cu.s.min}$  a partir de pletinas.

Otra consideración que podemos hacer es que la mayor parte de conductores formados de esta manera para máquinas de corrientes tan elevadas constan de 2 columnas de pletinas, lo cual nos puede orientar a la hora de elegir el ancho de la pletina. También debemos tener en cuenta el ancho del aislante (mica) que habrá a cada lado del conductor y en la separación de los mismos, para ello nos apoyaremos en la *tabla 5* que recoge características de los aislantes de mica en máquinas rotativas. Véase referencia [6]

Characteristic	Commutator micanite	Moulding micanite	Mica folium	Glass—mica tape	Epoxy glass mica paper tape
Mica content/%	95–98	80–90	40–50	40	45–55
Binder content/%	2–5	10–20	25–40	18–22	35–45
Content of the supporting material	—	—	20	40	15
Compression strength/N/mm <sup>2</sup>	110–170	—	—	—	—
Tensile strength/N/mm <sup>2</sup>	—	—	30–50	40–80	80–120
Compression/%	2–6	— <sup>a</sup>	—	—	—
Continuous operating temperature/°C, binder:					
Shellac	F155 <sup>b</sup>	F <sup>b</sup>	B130	B130	F155
Alkyds, epoxy	H180 <sup>c</sup>	H <sup>c</sup>	F155	F155	
Silicone	—	—	H180	H180	
Voltage strength/kV/mm (1 min, 50 Hz)	25	20	20	16–20	20–30

<sup>a</sup>In the production process, mica flakes glide with respect to each other. When the binder has set, the compression is 4–8%.

<sup>b</sup>In the commutators of insulation class F machines.

<sup>c</sup>In the commutators of insulation class H machines.

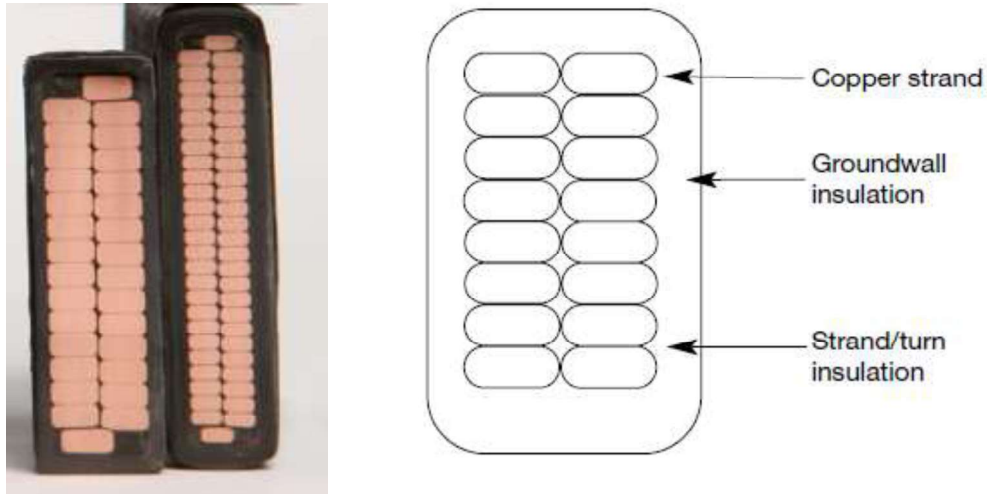
*Tabla 5. Propiedades de distintos aislantes de mica.*

Conocida la rigidez dieléctrica de nuestro aislante (Mica folium)  $\epsilon_a = 20 \text{ kV/mm}$  debemos determinar la tensión de ensayo del mismo  $U_{test}$ , que para máquinas de potencia mayor a  $1 \text{ kW}$  será la siguiente:

$$U_{test} := 2U_n + 1000V = 41 \cdot kV$$

$$\epsilon_a := 20 \frac{kV}{mm}$$





*Ilustración 4. Sección de un conductor del estator.*

Luego el ancho mínimo de aislante alrededor de las pletinas será:

$$b_{a.min} := \frac{U_{test}}{\epsilon_a} = 2.1 \cdot mm$$

Este ensayo tiene una duración de 60 segundos para motores nuevos, pero también hay que tener en cuenta que las máquinas de alta tensión deben soportar ondas de sobretensión de tipo impulso, estas deberán tener un valor mínimo de  $U_{impulso}$  durante su ensayo.

$$U_{impulso} := 4U_n + 5000V = 85 \cdot kV$$

$$b_a := \frac{U_{impulso}}{\epsilon_a} = 4.3 \cdot mm$$

Si queremos tener en cuenta todo el ancho de aislante de una ranura habrá que añadir la capa de mica que existe en la separación de las pletinas, que es mucho menor ya que la tensión es muy pequeña (la supondremos de  $0.6mm$ ).

$$b_{a.total} := 2b_a + 0.6mm = 9.1 \cdot mm$$

Luego un ancho de pletina favorable será:

$$b_{pletina} := \frac{b_{r.s} - b_{a.total}}{2} = 9.1 \cdot mm$$

Atendiendo a la tabla anterior escogeremos pletinas de  $9mm$  de ancho y ahora debemos escoger la sección de la pletina a partir de  $A_{cu1.s}$  vigilando que obtenemos un número par. Para ello se ha optado por escoger un número de pletinas, ver que sección tendría y decidir si es aceptable a partir de la tabla (prueba y error).

$$N_{pletinas} := 28$$

$$A_{pletina} := \frac{A_{cu.s.min}}{N_{pletinas}} = 17.2 \cdot mm^2$$

Escogeremos pletinas de  $A'_{pletina} = 17.5mm^2$  ya que es la más cercana y es ligeramente mayor, (denominaremos  $A'_{pletina}$  al valor real que tendrá la sección, y  $b'_{pletina}$  al ancho real de la misma) con lo cual nuestros valores reales de dimensiones de pletina y área total de cobre de un conductor  $A_{cu.s}$  serán los siguientes:

$$b'_{pletina} := 9mm$$

$$A'_{pletina} := 17.5mm^2$$

$$h_{pletina} := 2mm$$

$$A_{cu.s} := N_{pletinas} \cdot A'_{pletina} = 490 \cdot mm^2$$

#### 4.4 Profundidad de las ranuras

Cabe corregir ligeramente el ancho total de cada ranura y de cada diente:

$$b'_{r.s} := b_{a.total} + 2 \cdot b'_{pletina} = 27.1 \cdot mm$$

$$b'_{2.r.s} := b'_{r.s}$$

$$b'_{d.s} := \tau_{r.s} - b'_{r.s} = 27.6 \cdot mm$$

$$b'_{2.d.s} := b'_{d.s}$$

Como en cada ranura hay dos conductores cada uno de ellos aislados de manera independiente, podemos definir la altura total de ranura, para ello tendremos en cuenta el espesor del aislante alrededor del conductor y la trasposición de las pletinas (formación de barras Roebel) que obligan a que la altura de cada conductor sea igual a la altura de la mitad de las pletinas más la altura de una pletina (ver *ilustración 3*).

$$h_{r.s} := 2 \cdot \left[ \left( 1 + \frac{N_{pletinas}}{2} \right) \cdot h_{pletina} + 2b_a \right] = 77 \cdot mm$$

Esta será la altura de la ranura debido a conductores y aislante, también habrá que tener en cuenta el espacio necesario para el cierre de la ranura  $h_{2.r.s}$  (*ilustración 1*) el cual podemos suponer como  $15mm$ .

$$h_{2.r.s} := 15mm$$

Nuestro área total de ranura (sin contar el cierre) resultará:

$$A_{r.s} := b'_{r.s} \cdot h_{r.s} = 2086.7 \cdot mm^2$$

## 5. Factor de devanado

Con los cálculos de factor de paso  $k_p$ , factor de distribución  $k_d$  y factor de devanado  $k_w$  obtendremos un modelo más real de las fuerzas magnetomotrices  $f_{mm}$  generadas en el entrehierro ya que la distribución de las bobinas es de paso acortado y distribuido. En la *tabla 6* encontraremos los distintos tipos de devanado en función del tipo de la máquina. Véase referencia [2]

La gran mayoría de alternadores en este rango de potencias utilizan devanados fraccionarios, esto quiere decir que el número de

	Stator winding	Rotor winding
Salient-pole synchronous machine	Poly-phase distributed rotating-field slot winding	Salient-pole winding
Nonsalient-pole synchronous machine	Poly-phase distributed rotating-field slot winding	Slot winding
Synchronous reluctance machine	Poly-phase distributed rotating-field slot winding	—
PMSM, $q > 0.5$	Poly-phase distributed rotating-field slot winding	Permanent magnets

*Tabla 6. Distribución de los devanados en función del tipo de máquina.*

### 5.1 Factor de paso $K_p$

El factor de paso  $k_p$ , hará referencia a la diferencia entre las fuerzas magnetomotrices generadas por una bobina de paso acortado frente a la de paso diametral y se define como el cociente de estas dos, como cabe esperar su valor nunca sobrepasará la unidad. Su cálculo puede resumirse a la siguiente expresión:

$$k_p = \cos(\beta)$$

Siendo  $\beta$  el doble del valor del ángulo elegido para el acortamiento de paso, (*ilustración 5*).



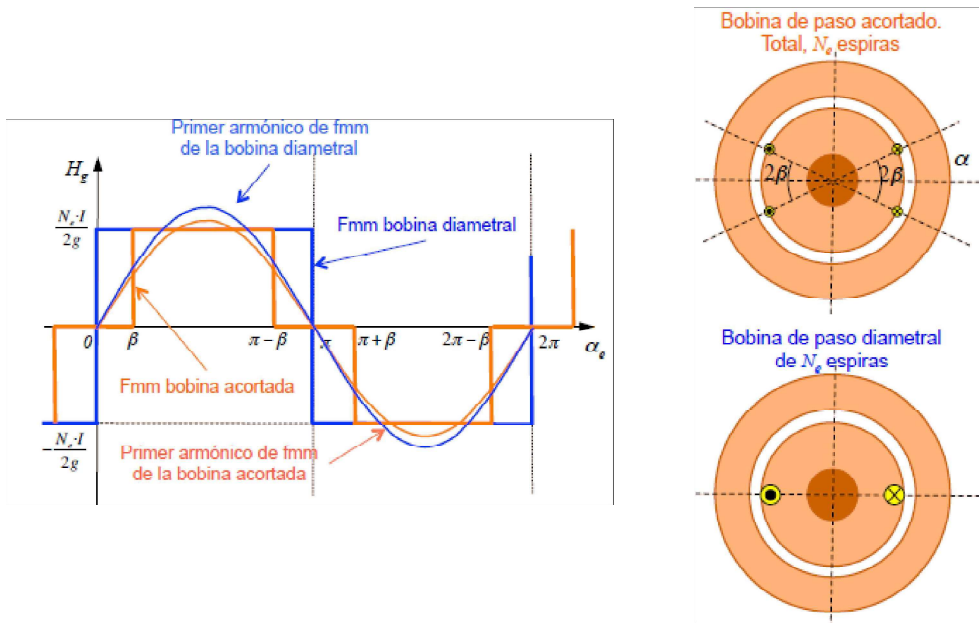


Ilustración 5.. Factor de paso.

Lo primero que debemos definir será cual será nuestro acortamiento, para elegir uno apropiado en el caso de estudio al haber escogido  $q=9$  obtenemos un total de 27 ranuras por polo (como hemos mencionado anteriormente se tratará de un devanado entero) con lo cual nos inclinaremos a escoger un acortamiento de paso de  $k_{paso}=1/9$  para obtener un número entero de ranuras por bobina.

$$k_{paso} := \frac{1}{9}$$

Con lo que obtenemos:

$$\beta := k_{paso} \cdot \frac{360^\circ}{2p \cdot 2} = 10^\circ$$

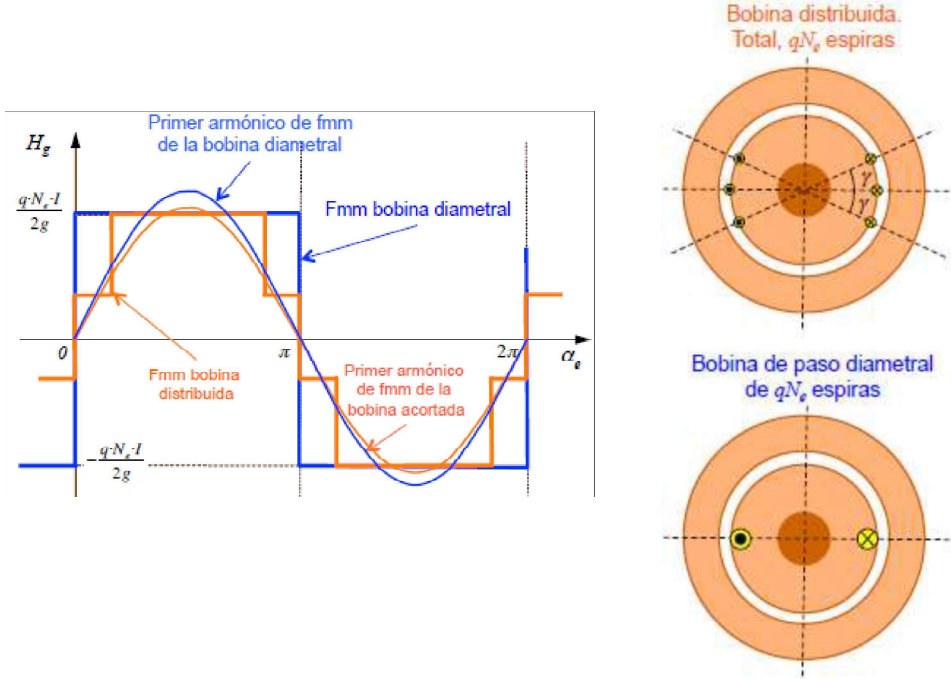
$$k_p := \cos(\beta) = 0.985$$

## 5.2 Factor de distribución $K_d$

El factor de distribución  $k_d$  hará referencia a la diferencia entre las fuerzas magnetomotrices generadas por una bobina de paso distribuido frente a las generadas por una bobina de paso diametral y se define como el cociente de estas dos, también cabe esperar que no sobrepasará la unidad. Para su cálculo utilizaremos la siguiente expresión:

$$k_d = \frac{\sin\left(\frac{\gamma_e}{2} q\right)}{q \sin\left(\frac{\gamma_e}{2}\right)}$$

Siendo  $\gamma_e$  el ángulo eléctrico entre ranuras, para su cálculo necesitaremos conocer el ángulo geométrico entre ranuras  $\gamma_g$ , y el numero de polos ( $\gamma_e = p\gamma_g$ ).



*Ilustración 6. Factor de distribución.*

$$\gamma_g := \frac{360^\circ}{N_r} = 6.67^\circ$$

$$\gamma_e := p \cdot \gamma_g = 6.67^\circ$$

$$k_d := \frac{\sin\left(\frac{q \cdot \gamma_e}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\gamma_e}{2}\right)} = 0.96$$

### 5.3 Factor de devanado $K_w$

El factor de devanado  $K_w$  se define como el producto de estos dos últimos.

$$k_w := k_p \cdot k_d = 0.94$$

## **6. Flujo magnético**

En un principio hemos estimado un valor para la densidad de flujo máxima  $B_m$ , ahora surge la necesidad de comprobar si  $B_m$  es correcta y concuerda con el flujo necesario  $\phi_m$  para inducir la fuerza electromotriz  $E$  en cada una de las fases de nuestra máquina.

Particularizando para nuestro caso, por estar conectado en estrella obtenemos:

$$E := \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 11.547 \cdot kV$$

Utilizando la expresión de el valor eficaz de la fuerza electromotriz inducida en cada una de las fases de bobinas distribuidas de paso acortado podemos obtener el flujo.

*Véase referencia 3*

$$\phi_m := \frac{E}{4.44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_w} = 3.071 \text{ Wb}$$

Ahora podemos comprobar que valor de densidad de flujo real  $B'_m$  corresponde a nuestro problema, si este valor no es aceptable, debemos rectificar nuestro modelo hasta conseguirlo:

$$B'_m := p \cdot \frac{\phi_m}{(L_s \cdot D)} = 0.82 \text{ T}$$

## **7. Resistencia del devanado inducido**

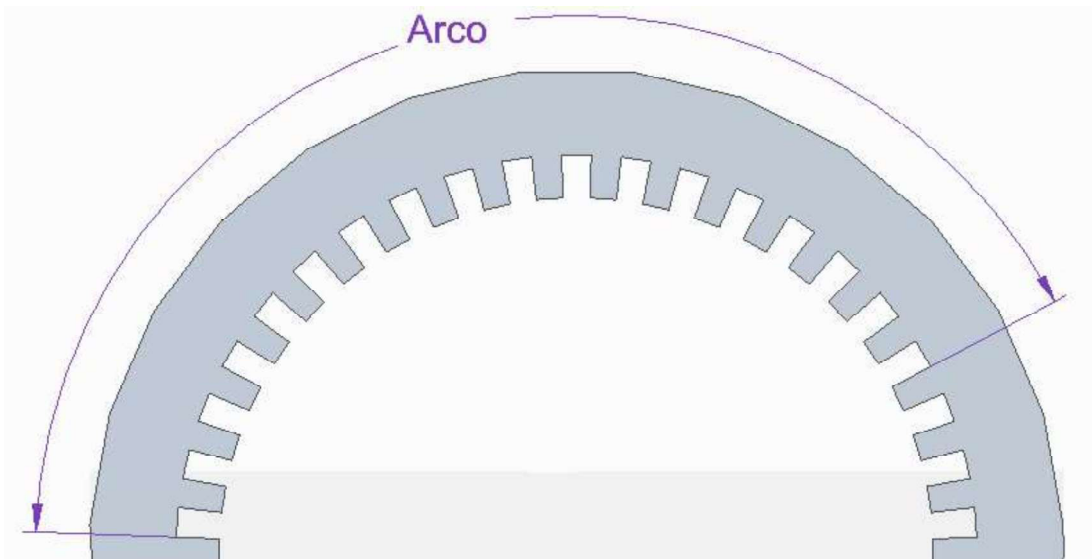
Para el cálculo de  $R_s$  debemos conocer la resistividad de nuestros conductores (de cobre).

$$\rho_{cu} := \frac{1}{56} \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$$

El siguiente paso será determinar cuantos dientes y ranuras recorre una bobina  $N_{d,b}$  y  $N_{r,b}$  respectivamente (las bobinas atraviesan el estator paralelas al eje y se cierran por los extremos formando arcos para poder introducir el rotor, (ver *ilustraciones 5 y 6*). Podemos calcularlo de la siguiente manera:

$$N_{r,b} := \frac{N_r}{2 \cdot p} - k_{paso} \cdot \left( \frac{N_r}{2 \cdot p} \right) = 24$$

$$N_{d,b} := N_{r,b} = 24$$



Luego la distancia del arco recorrido en cada extremo será:

$$Arco := N_{r,b} \cdot b_{r,s} + N_{d,b} \cdot b_{d,s} = 1313.2 \cdot mm$$



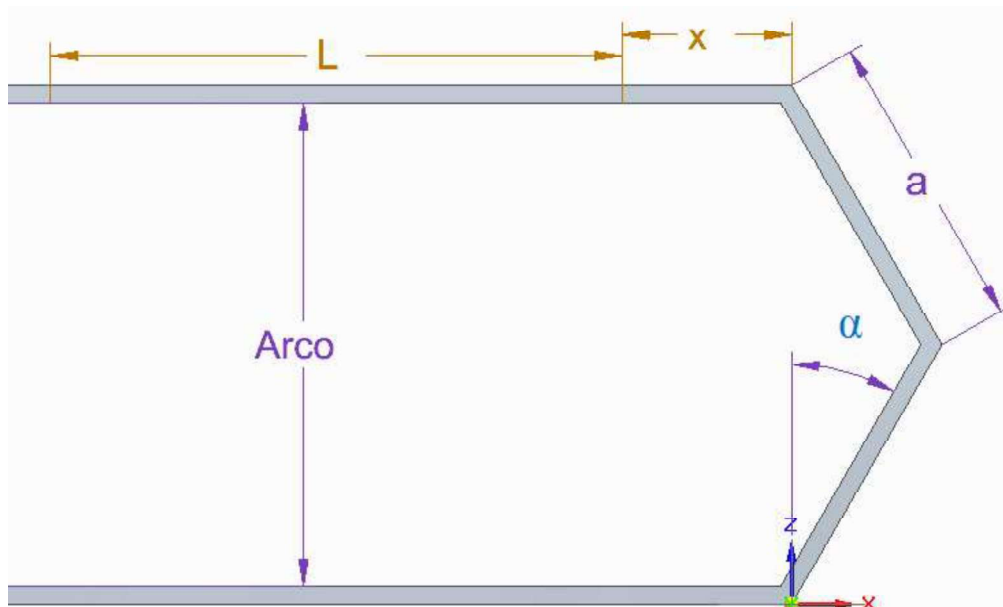
*Ilustración 7. Bobina preformada.*



*Ilustración 8. Cabezas de bobina del estator.*

Para determinar un modelo de cálculo de la longitud de las cabezas de bobina nos apoyaremos en la *ilustración 9* en la cual está representado el recorrido de una espira, siendo  $2a+2x$  el recorrido de una cabeza de bobina,  $L$  la longitud del estator y  $\alpha$  el ángulo que forman las cabezas de bobina.

Las dos cabezas de bobina de cada bobina son iguales por eso se ha representado solo una.



*Ilustración 9. Recorrido de una espira..*

Introduciremos el valor de  $\alpha$  y  $x$  (en nuestro caso se han supuesto  $30^\circ$  y  $15\text{cm}$  respectivamente)

$$\alpha := 30^\circ$$

$$x := 250\text{mm}$$

$$a := \frac{\text{Arco}}{2 \cdot \cos(\alpha)} = 758.2\text{mm}$$

$$L_b := 2 \cdot (L_s + 2 \cdot a + 2 \cdot x) = 1203.3\text{cm}$$

Una vez conocida la longitud de una espira  $L_b$  podemos estimar la resistencia de la misma  $R_{s,b}$  y la resistencia de una fase  $R_s$ .

$$R_{s,b} := \rho_{cu} \cdot \frac{L_b}{A_{cu,s}} = 4.385 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_s := \frac{N_f \cdot N_{s,b} \cdot R_{s,b}}{N_m} = 0.008 \Omega$$

Para la temperatura de trabajo obtenemos:

$$R_{s,T\text{trabajo}} := R_s \cdot \frac{(234.5^\circ\text{C} + T_{\text{trabajo}})}{(234.5^\circ\text{C} + 20^\circ\text{C})} = 0.009 \Omega$$

## 8. Determinación del entrehierro

Para un cálculo aproximado del entrehierro de nuestra máquina utilizaremos la siguiente expresión:

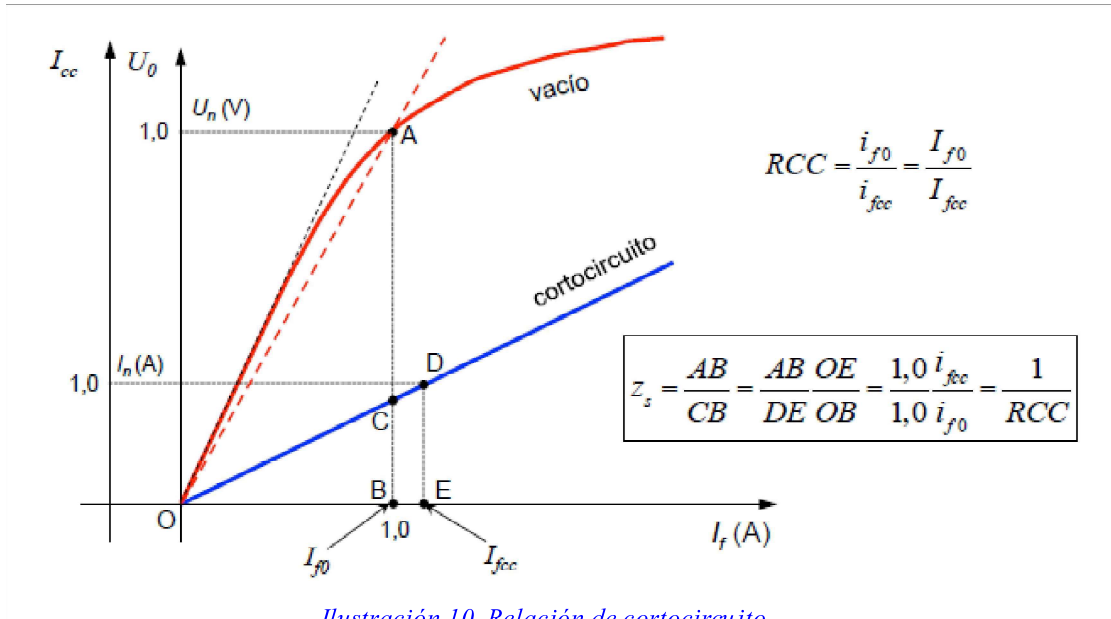
$$g = \frac{\mu_0 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \frac{A_{in}}{B_m} \frac{1}{\left( x_s - \frac{x_\sigma}{1 + k_s} \right)}$$

En la cual  $x_s$  corresponde la reactancia síncrona,  $x_\sigma$  a la reactancia de dispersión y  $k_s$  al factor de saturación del circuito magnético ( $k_s$  típicamente toma valores entre 0.12 y 0.16). Véase referencia 7

$$k_s := 0.14$$

### 8.1 Reactancia síncrona $X_s$

La reactancia síncrona  $X_s$  la deduciremos a partir de la relación de cortocircuito.



$$x_s := \frac{1}{SCR} = 1.429$$

Al ser valores en p.u (por unidad) no se les asigna ninguna unidad.

## 8.2 Reactancia de dispersión $X_\sigma$

El cálculo de la reactancia de dispersión  $X_\sigma$  constará de 2 partes, una de ellas hará referencia a la dispersión en las ranuras  $X_{ran}$ , y otra a las cabezas de bobina  $X_{cb}$ , sumando ambas obtendremos  $X_\sigma$ . Véase referencia [7]

$$X_{ran} = 2\pi f \frac{2\mu_0 N_s^2}{p} L \frac{1}{q} \lambda_{ran}$$

Siendo  $\lambda_{ran}$ :

$$\lambda_{ran} = \frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_2}{b_2}$$

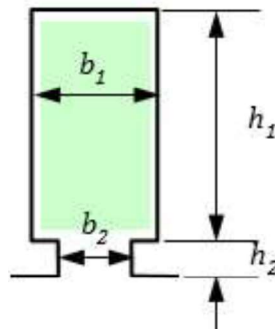


Ilustración 11. Cálculo  $X_{ran}$

$$X_{cb} = 2\pi f \frac{2\mu_0}{p} 0,4 N_s^2 L_{cb}$$

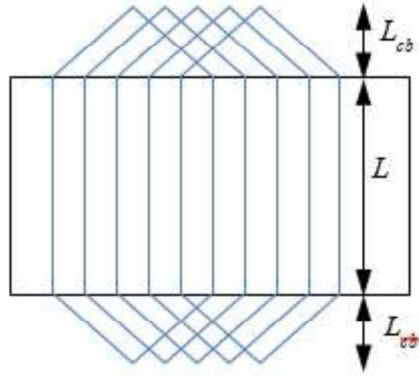


Ilustración 12. Cálculo  $X_{cb}$

$L_{cb}$  será la longitud de cabezas de bobina. Si particularizamos estas expresiones para nuestro caso obtenemos:

$$\lambda_{ran} := \frac{h_{r.s}}{3 \cdot b'_{r.s}} + \frac{h_{2.r.s}}{b'_{2.r.s}} = 1.501$$

$$X_{ran} := 2 \cdot \pi f \cdot \frac{2\mu_0 N_s^2 \cdot L_s \cdot \lambda_{ran}}{p \cdot q} = 0.171 \cdot \Omega$$



$$L_{cb} := 4a + 4x = 403.26 \cdot cm$$

$$X_{cb} := 2\pi f \cdot \frac{2\mu_0 \cdot 0.4 \cdot L_{cb} \cdot N_s^2}{p} = 0.413 \Omega$$

$$X_{\sigma} := X_{ran} + X_{cb} = 0.583 \Omega$$

$$x_{\sigma} := \frac{X_{\sigma}}{Z_b} = 0.15$$

$$\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6} \cdot \frac{N}{A^2}$$

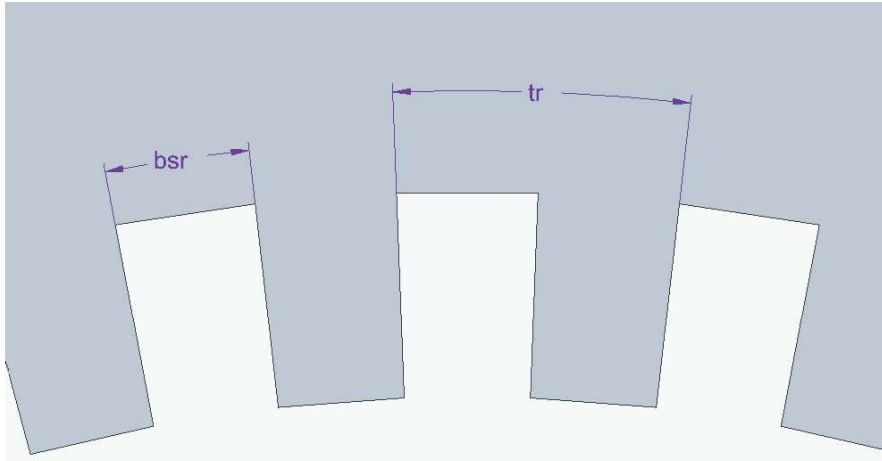
### 8.3 Entrehierro geométrico

Finalmente retomando la expresión anterior obtenemos:

$$g := \frac{\mu_0 \cdot \sqrt{2} \cdot A_{\mu} \cdot \tau_p}{\pi \cdot B_m \cdot \left( x_s - \frac{x_{\sigma}}{1 + k_s} \right)} = 64.3 \cdot mm$$

### 8.4 Factor de Carter $K_{cl}$

Una vez calculado el entrehierro geométrico  $g$ , si se quiere sustituir esta máquina por una ideal equivalente sin ranuras de tal forma que ambas tengan el mismo flujo magnético, debemos tener en cuenta que es preciso que tenga un mayor espesor de entrehierro que el de la máquina original, al que llamaremos entrehierro efectivo  $g_0$ . Para ello utilizaremos el factor de Carter  $k_c$ :



*Ilustración 13. Ancho y paso de ranura del estator.*

$$b'_{r.s} = 0.027 \text{ m}$$

$$\tau_{r.s} = 54.7 \cdot \text{mm}$$

Existen varias expresiones formuladas por distintos autores para su determinación, aunque casi todas ellas concluyen en valores muy parecidos en la práctica. Una de la más utilizadas es la siguiente:

$$k_{c1} := \frac{\tau_{r.s}}{\tau_{r.s} - \left( \frac{b'^2_{r.s}}{5 \cdot g + b'_{r.s}} \right)} = 1.04$$

Una vez determinado el factor de Carter del estator ( $k_{c1}$ ) falta calcular el del rotor cuya expresión es la misma ( $k_{c2}$ ). Como todavía no está determinada la geometría del rotor hallaremos el entrehierro efectivo  $g_0$  cuando esté dimensionado.

## **9. Cálculo geométrico del devanado inductor**

### **9.1 Diámetro del rotor**

Una vez calculado el entrehierro geométrico podemos empezar determinando nuestro diámetro rotórico.

$$D_r := D - g = 876.2 \cdot mm$$

### **9.2 Ranuras y dientes del rotor**

Para el cálculo de las ranuras primero habrá que determinar que porcentaje del rotor estará ranurado ya que no el 100% del rotor de los turboalternadores esta ranurado, existen zonas lisas que constituyen las caras de los polos magnéticos. Normalmente la parte ranurada suele comprender entre un 65 y un 70% ( $k_r$ ) de la superficie del rotor.

A su vez también habrá que decidir el número de ranuras por polo  $q_r$ , una cifra orientativa para esta estimación puede ser de 10 a 18 ranuras por polo (debe ser un número par ya que el llenado de las bobinas se realiza la mitad por un polo y la mitad por el otro).

$$k_r := 70$$

$$q_r := 16$$

Con estos datos, si definimos una relación entre el ancho de ranura y paso de ranura para el rotor  $k_{\tau,r}$  ya podemos determinar el ancho de ranura  $b_{r,r}$ .

$$k_{\tau,r} := 0.35$$

$$b_{r,r} := \left( \frac{k_r \cdot k_{\tau,r}}{100} \right) \left( \frac{\pi \cdot D_r}{2 \cdot p \cdot q_r} \right) = 21.1 \cdot mm$$

Ahora necesitamos conocer la corriente de excitación  $I_f$  la que circulará por los conductores del rotor para conocer la profundidad de las ranuras. Pero antes de continuar con el problema calcularemos el paso de ranura  $\tau_{r,r}$  del rotor y calcularemos el factor de Carter  $k_{c2}$ .

### 9.3 Factor de Carter $K_{c2}$ y entrehierro efectivo $g_0$

La expresión utilizada es la misma que en el estator como hicimos con  $k_{c1}$ .

$$b_{d.r} := \frac{b_{r.r}}{k_{\tau.r}} - b_{r.r} = 39.1 \cdot mm$$

$$\tau_{r.r} := b_{r.r} + b_{d.r} = 60.2 \cdot mm$$

$$k_{c2} := \frac{\tau_{r.r}}{\tau_{r.r} - \frac{b_{r.r}^2}{5 \cdot g + b_{r.r}}} = 1.02$$

Nuestro entrehierro efectivo  $g_0$  será:

$$g_0 := k_{c1} \cdot k_{c2} \cdot g = 68.3 \cdot mm$$

## **10. Corriente de excitación**

### **10.1 Corriente de excitación en vacío**

Para continuar con el problema debemos calcular la corriente que circulará por nuestros conductores, para ello necesitamos conocer cual será la fuerza magnetomotriz  $F_{m.g}$  en el entrehierro, la manera de hallarlo será a través del campo magnético  $H_m$ .

$$H_m := \frac{B'_m}{\mu_0} = 6.496 \times 10^5 \frac{A}{m}$$

$$F_{m.g} := H_m \cdot g = 4.174 \times 10^4 A$$

La fuerza magnetomotriz en el rotor (excitación) será mayor que la que hay en el entrehierro, a falta de un estudio detallado de las caídas de tensión magnéticas en cada uno de los tramos del circuito magnético (fundamentalmente entrehierro, pero también dientes, culata, etc.) podemos suponer que será un 12% mayor.

$$F_{m.f} := 1.12 \cdot F_{m.g} = 4.675 \times 10^4 A$$

Para poder hallar la corriente solo nos queda conocer el factor de devanado rotórico  $k_{w.f}$  y un número de conductores por ranura para hallar el número de espiras totales del devanado de excitación  $N_f$ , este valor será estimado y posteriormente corregido si es necesario, ya que no queremos una corriente muy elevada (pérdidas en el cobre), ni un número muy elevado de conductores (costes de fabricación).

En el caso del estudio del rotor el factor de devanado será igual al factor de distribución, ya que no existe ningún tipo de acortamiento de paso

$$\gamma_{g.r} := \frac{k_r}{100} \cdot \frac{360^\circ}{2 \cdot p \cdot q_r} = 7.9^\circ$$

$$\gamma_{e.r} := p \cdot \gamma_{g.r} = 7.9^\circ$$

$$k_{w.f} := \frac{\sin\left(q_r \cdot \frac{\gamma_{e.r}}{2}\right)}{q_r \cdot \sin\left(\frac{\gamma_{e.r}}{2}\right)} = 0.81$$

Para continuar definiremos un número de conductores por ranura al que llamaremos  $N_c$  y obtendremos un valor para  $N_f$  (si obtenemos una corriente de excitación no deseada corregiremos su valor).

$$N_c := 10$$

$$N_f := N_c \cdot q_r \cdot p = 160$$

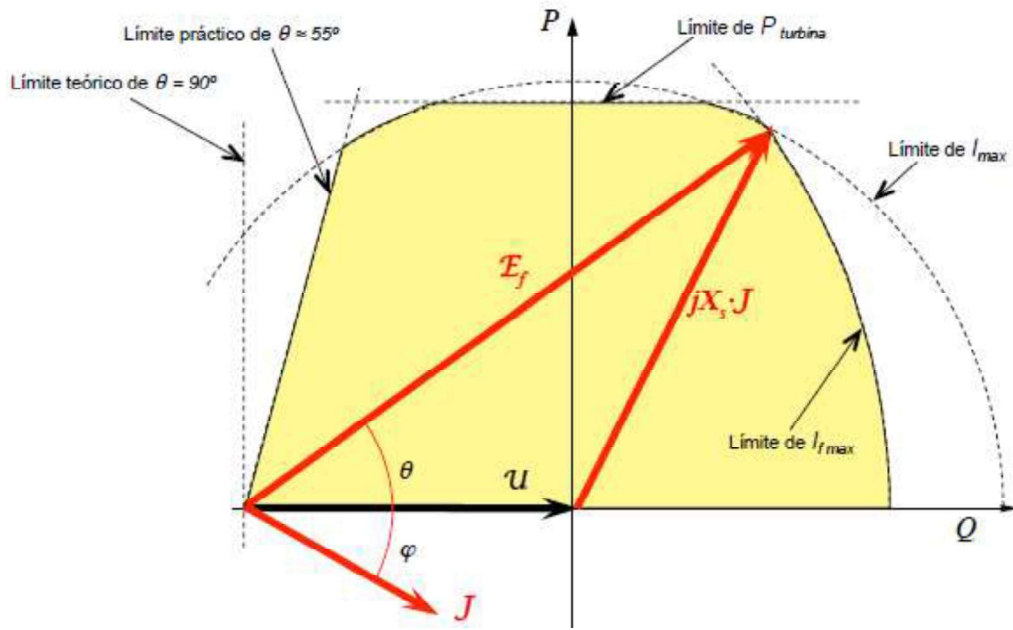
Nuestra corriente de excitación en vacío  $I_{f0}$  resultará:

$$I_{f0} := \frac{F_{m,f} \cdot 2 \cdot p \cdot \pi}{4 N_f \cdot k_{w,f}} = 565.91 \text{ A}$$

Se puede apreciar que no se ha tenido en cuenta la reacción de inducido del devanado estático ya que por este no circula corriente en su funcionamiento en vacío.

## 10.2 Corriente de excitación a plena carga

Para conocer la corriente en plena carga utilizaremos la relación entre la fuerza electromotriz inducida a plena carga  $E_f$  y la fuerza electromotriz inducida en vacío  $U$ , nos apoyaremos en el siguiente diagrama (*ilustración 14*) para ilustrar el cálculo de  $E_f$ .



*Ilustración 14. Diagrama fasorial  $E_f$ .*

Para este apartado en el que operaremos con vectores, se han definido los vectores adimensionales (dividiendo cada componente entre sus respectivas unidades), ya que Mathcad no realiza algunas operaciones como la de hallar el módulo de un vector si estos tienen unidades.

$$U := \begin{pmatrix} \frac{U_n}{V\sqrt{3}} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.155 \times 10^4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\varphi := \arccos(\cos\varphi) = 36.87^\circ$$

$$X_s := x_s \cdot \frac{Z_b}{\Omega} = 5.71$$

El vector que representa la caída de tensión en la reactancia sincrónica  $iX_s J$  será:

$$iX_s J := \begin{pmatrix} X_s \cdot I_n \cdot \frac{\cos(90^\circ - \varphi)}{A} \\ X_s \cdot I_n \cdot \frac{\sin(90^\circ - \varphi)}{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9897.433 \\ 1.32 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

La fuerza electromotriz inducida a plena carga (en voltios) será:

$$E_f := \vec{U} + iX_s J = \begin{pmatrix} 2.144 \times 10^4 \\ 1.32 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$|E_f| = 2.518 \times 10^4$$

$$\theta := \operatorname{atan}\left(\frac{E_{f_1}}{E_{f_0}}\right) = 31.61^\circ$$

Ya podemos definir la relación entre tensiones a plena carga y en vacío y con ello la corriente de excitación a plena carga:

$$\frac{|E_f|}{|U|} = 2.181$$

$$I_f := I_{f0} \frac{|E_f|}{|U|} = 1234.04 \text{ A}$$



## **11. Resistencia del devanado de excitación**

Conociendo la tensión de excitación  $V_{exc}$  y la corriente de excitación  $I_f$  podemos definir la resistencia del devanado rotórico completo  $R_f$ , una vez hallada esta podremos calcular la resistencia de una sola espira  $R_{f.b}$ , y solo nos quedaría estimar la longitud de los mismos para hallar el área que ocupará cada conductor y así saber como de profundas deberán ser nuestras ranuras.

$$R_f := \frac{V_{exc}}{I_f} = 0.365 \Omega$$

$$R_{f.b} := \frac{R_f}{N_f} = 0.002 \cdot \Omega$$

Estos valores calculados a plena carga se dan a la temperatura de trabajo  $T_{trabajo}$  para conocer su valor a 20°C:

$$R_{f.b20^\circ C} := R_{f.b} \cdot \frac{(234.5^\circ C + 20^\circ C)}{(234.5^\circ C + T_{trabajo})} = 0.002 \Omega$$

## **12. Conductores del rotor**

### **12.1 Longitud de los conductores**

Una vez determinada la resistencia de un solo conductor y conocida la resistividad del cobre  $\rho_{cu}$ , haremos una estimación de la longitud media de los conductores en el rotor para hallar el área de cada ranura, para ello vamos a estudiar la longitud de los conductores en cada par de ranuras (1 espira), realizar la media de estos y obtener la longitud media.

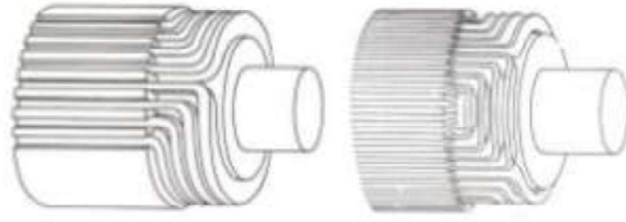
Primero definiremos la longitud de los arcos sin ranurar entre ambos polos  $Arco_{liso}$ :

$$Arco_{liso} := \left( \frac{100 - k_r}{100} \right) \cdot \frac{\pi \cdot D_r}{2} = 412.9 \cdot mm$$



*Ilustración 15. Devanado rotórico.*

El llenado de las bobinas se realiza por ambas caras lisas, es decir la mitad por un lado y la mitad por el otro (para minimizar la cantidad de cobre utilizada), en nuestro caso particular al tener 16 ranuras por polo llenaremos 8 por un arco liso y las otras 8 por el otro. Luego el estudio se simplifica a la determinación de la longitud media de los pares de conductores que pasan por un arco sin ranurar que serán  $q_r/2$  pares de conductores. Llamaremos  $N_{pc}$  al número de pares de conductores (cada par forma una bobina), y así denominar al par de conductores 1-1 (los más cercanos al arco sin ranurar) como  $N_{pc}=1$ , al par 2-2 (los adyacentes a 1-1) como  $N_{pc}=2$  y así sucesivamente, y estudiaremos únicamente 8 pares de conductores ya que los otros 8 son simétricos y de iguales dimensiones.



*Ilustración 16. Llenado de ranuras del rotor.*

$$N_{pc} := 1, 2 \dots \frac{q_r}{2} =$$

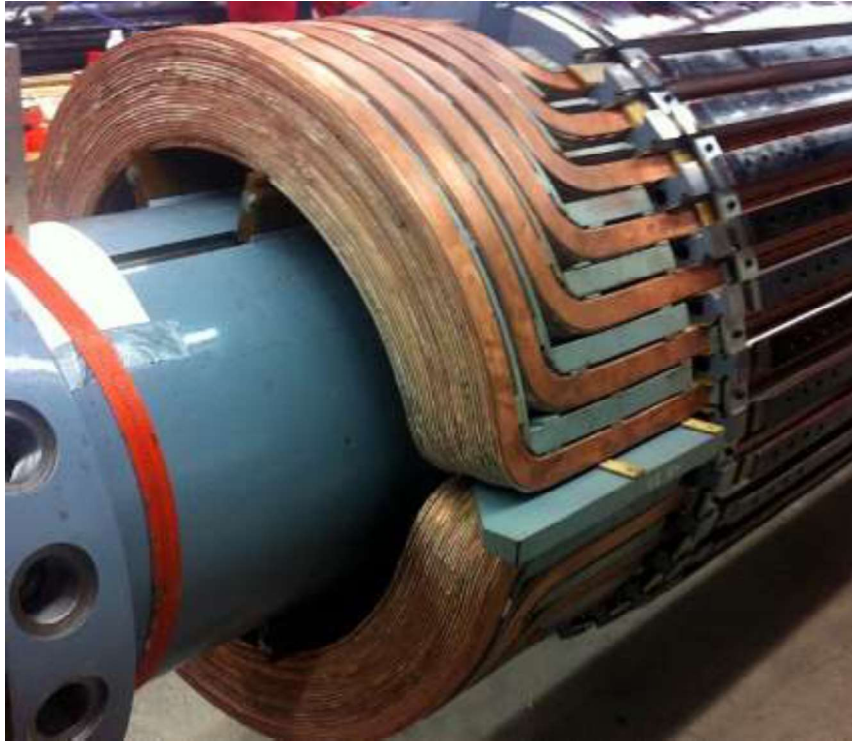
1
2
3
4
5
6
7
8

El saliente de las cabezas de bobina será la longitud del arco entre cada par de ranuras más la distancia que ocupan al apilarse una encima de la otra, para el primer par de ranuras supondremos una distancia de unos  $15cm$  de saliente del rotor (más el arco sin ranurar), y para las demás unos  $2cm$  mas el ancho de ranura  $b_{r,r}$  (más el arco entre ranuras). Para ilustrar esta hipótesis nos ayudarán las *ilustraciones 15, 16 y 17*.

Podemos estimar la longitud de cada espira  $L_c$  con la siguiente expresión que reúne lo dicho anteriormente.

$$L_c := 2 \cdot \left[ L_s + Arco_{liso} + 2 \cdot 15cm + (N_{pc} - 1) \cdot (4 \cdot b_{r,r} + 2 \cdot b_{d,r} + 2 \cdot 2cm) \right]$$

$$L_c = \begin{pmatrix} 9.426 \\ 9.831 \\ 10.236 \\ 10.641 \\ 11.047 \\ 11.452 \\ 11.857 \\ 12.262 \end{pmatrix} m \quad L_{cmedia} := mean(L_c) = 10.844 m$$



*Ilustración 17. Forma de los conductores del rotor.*

## 12.2 Dimensionado de conductores

Conocidas la longitud media de los conductores  $L_{media}$ , y la resistencia de los mismos  $R_{fb20^\circ}$ , podemos determinar el área que ocuparán. Comenzaremos definiendo el área de cobre mínima  $A_{cu.r.min}$ , y luego a partir de nuestro ancho de ranura escogeremos un conductor adecuado de la *tabla 4*, así obtendremos el área real de una pletina.

$$A_{cu.r.min} := \rho_{cu} \cdot \frac{L_{media}}{R_{fb20^\circ C}} = 96.6 \cdot mm^2$$

$$b_{r.r} = 21.1 \cdot mm$$

Como hicimos en el cálculo del estator, debemos tener en cuenta el ancho que ocupará el aislante para estimar un ancho de pletina favorable  $b_{pletina.r}$  (es un caso muy diferente al del estator ya que nos encontramos con tensiones mucho más pequeñas las cuales no precisan un aislante tan grande), nos apoyaremos en la *tabla 7* que muestra los aumentos de dimensiones debidos al aislante de esmalte en conductores de cobre rectangulares. Véase referencia [5]

Aislamiento: <b>esmalte</b>	
Tipo de aislamiento	Aumento de dimensiones (micra)
Fino	50 (35 ÷ 60)
Medio	80 (60 ÷ 100)
Grueso	130 (100 ÷ 150)

*Tabla 7. Aumento de dimensiones por aislamiento en conductores rectangulares de cobre*

$$b_{a.r} := 130 \cdot 10^{-3} mm$$

$$b_{pletina.r} := b_{r.r} - 2 \cdot b_{a.r} = 20.8 \cdot mm$$



**TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN RECTANGULAR (Área en mm²)**

Grosor (mm)	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	10.0	
Ancho (mm)																																
0.9	-	0.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1.0	-	-	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1.2	-	-	-	1.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1.4	0.98	1.12	1.26	1.40	-	-	-	1.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1.6	1.14	1.30	1.46	1.62	1.78	1.87	-	-	2.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1.8	1.30	1.48	1.66	1.84	2.02	2.13	2.31	2.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2.0	1.46	1.66	1.86	2.06	2.19	2.39	2.59	2.79	2.99	3.19	-	-	3.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2.2	1.62	1.84	2.06	2.21	2.43	2.65	2.87	3.09	3.31	3.53	3.65	-	-	4.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2.5	1.86	2.11	2.36	2.54	2.79	3.04	3.29	3.54	3.79	4.04	4.19	4.44	4.69	-	5.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2.8	2.10	2.38	2.66	2.87	3.15	3.43	3.71	3.99	4.17	4.45	4.75	5.01	5.29	5.85	-	7.28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3.0	2.26	2.56	2.86	3.09	3.39	3.69	3.99	4.19	4.49	4.79	5.09	5.39	5.69	6.29	7.19	-	8.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3.2	2.42	2.74	3.06	3.31	3.63	3.95	4.27	4.49	4.81	5.13	5.45	5.77	6.09	6.73	7.69	8.41	-	9.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3.5	2.66	3.01	3.36	3.64	3.99	4.34	4.69	4.94	5.29	5.64	5.99	6.34	6.69	7.39	8.20	9.25	9.95	-	11.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3.8	2.90	3.28	3.66	3.97	4.35	4.73	5.11	5.39	5.77	6.15	6.53	6.91	7.29	8.05	8.95	10.10	10.90	11.60	-	13.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4.0	3.06	3.46	3.86	4.19	4.59	4.99	5.39	5.69	6.09	6.49	6.89	7.29	7.69	8.35	9.45	10.70	11.50	12.30	13.30	-	15.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4.5	3.46	3.91	4.36	4.74	5.19	5.64	6.09	6.44	6.89	7.34	7.79	8.24	8.45	9.35	10.70	12.10	13.00	13.90	15.20	-	17.10	19.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5.0	3.86	4.36	4.86	5.29	5.79	6.29	6.79	7.19	7.69	8.19	8.69	9.10	9.45	10.50	12.00	13.50	14.50	15.50	16.60	-	19.10	21.60	24.14	-	-	-	-	-	-	-	-	
5.5	4.26	4.81	5.36	5.84	6.39	6.94	7.49	7.94	8.49	9.04	9.59	10.10	10.50	11.60	13.20	14.90	16.00	17.00	18.40	-	21.10	23.85	26.60	29.30	-	-	-	-	-	-	-	
6.0	4.66	5.26	5.86	6.39	6.99	7.59	8.19	8.69	9.29	9.89	10.50	11.10	11.50	12.70	14.50	16.30	17.50	18.30	20.10	-	23.10	26.10	29.10	32.10	35.14	-	-	-	-	-	-	
6.5	5.06	5.71	6.36	6.94	7.59	8.24	8.89	9.44	10.10	10.70	11.40	12.00	12.50	13.80	15.70	17.70	19.00	19.90	21.90	-	25.10	28.40	31.60	34.90	38.10	41.40	-	-	-	-	-	
7.0	5.46	6.16	6.86	7.49	8.19	8.89	9.59	10.20	10.90	11.60	12.30	13.00	13.50	14.90	17.00	19.10	20.50	21.50	23.60	-	27.10	30.60	34.10	37.60	41.10	44.60	48.10	-	-	-	-	
7.5	5.86	6.61	7.36	8.04	8.79	9.54	10.30	10.90	11.70	12.40	13.20	13.90	14.50	16.00	18.20	20.50	22.00	23.10	25.40	-	29.10	32.90	36.60	40.40	44.10	47.90	51.60	55.40	-	-	-	
8.0	6.26	7.06	7.86	8.59	9.39	10.20	11.00	11.70	12.50	13.30	14.00	15.50	17.10	17.50	21.90	23.50	24.70	27.10	27.10	-	31.10	35.10	39.10	43.10	47.10	51.10	55.10	59.10	63.10	-	-	
9.0	7.06	7.96	8.86	9.69	10.60	11.50	12.40	13.20	14.10	15.00	15.90	16.80	17.50	19.30	22.00	24.70	26.50	27.90	30.60	-	35.10	39.60	44.10	48.60	53.10	57.60	62.10	66.60	71.10	80.10	-	
10.0	7.86	8.86	9.86	10.80	11.80	12.80	13.80	14.70	15.70	16.70	17.70	18.70	19.50	21.50	24.50	27.50	29.50	31.10	34.10	-	39.10	44.10	49.10	54.10	59.10	64.10	69.10	74.10	79.10	89.10	99.10	
11.0	8.66	9.76	10.90	11.90	13.00	14.10	15.20	16.20	17.30	18.40	19.50	20.60	21.50	23.70	27.00	30.30	32.50	34.30	37.60	-	43.10	48.60	54.10	59.60	65.10	70.60	76.10	81.60	87.10	98.10	109	
12.0	9.46	10.70	11.90	13.00	14.20	15.40	16.60	17.70	18.90	20.10	21.30	22.50	23.50	25.90	29.50	33.10	35.50	37.50	44.10	-	47.10	53.10	59.10	65.10	71.10	77.10	83.10	89.10	95.10	107	119	
13.0	10.30	11.60	12.90	14.10	15.40	16.20	18.00	19.20	20.50	21.80	23.10	24.40	25.50	28.10	32.00	35.90	38.50	40.70	44.60	-	51.10	57.60	64.10	70.60	77.10	83.60	90.10	96.60	103	116	129	
14.0	11.10	12.50	13.90	15.20	16.60	18.00	19.40	20.70	22.10	23.50	24.90	26.30	27.50	30.30	34.50	38.70	41.50	43.90	48.10	-	55.10	62.10	69.10	76.10	83.10	90.10	97.10	104	111	125	139	
15.0	11.90	13.40	14.90	16.30	17.80	19.30	20.80	22.20	23.70	25.20	26.70	28.20	29.50	32.50	37.00	41.50	44.50	47.10	51.60	-	59.10	66.60	74.10	81.60	89.10	96.60	104	112	119	134	149	
16.0	12.70	14.30	15.90	17.40	19.00	20.60	22.20	23.70	25.30	26.90	28.50	30.10	31.50	34.70	39.50	44.30	47.50	50.30	55.10	-	63.10	71.10	79.10	87.10	95.10	103	111	119	127	143	159	
18.0	-	16.10	17.90	19.60	21.40	23.20	25.00	26.70	28.50	30.30	32.10	33.90	35.50	39.10	44.50	49.90	53.50	56.70	62.10	-	71.10	80.10	89.10	98.10	107	116	125	134	143	161	179	
20.0	-	-	19.90	21.80	23.80	25.80	27.80	29.70	31.70	33.70	35.70	37.70	39.50	43.50	49.50	55.50	59.50	63.10	69.10	-	79.10	89.10	99.10	109	119	129	139	149	159	179	199	
22.0	-	-	-	24.00	26.00	28.40	30.60	32.70	34.90	37.10	39.30	41.50	43.50	47.90	54.50	61.10	65.50	69.50	76.10	-	87.10	98.10	109	120	131	142	153	164	175	197	219	
25.0	-	-	-	-	32.30	34.80	37.20	39.70	42.20	44.70	47.20	49.50	54.50	62.00	69.50	74.00	79.10	86.60	-	99.10	112	124	137	149	162	174	187	199	224	249	274	

Subrayado: No aplicable cuando el aislante es algodón.

Doble subrayado: No aplicable cuando el aislante es algodón o papel.

*Tabla 4. Sección real de conductores en función de las dimensiones de las pletinas.*

Escogeremos pletinas de  $20mm$  de ancho y asignando valores al número de pletinas ( $N_{pletinas.r}$ ) y conociendo el área de cobre  $A_{cu.l.r}$  que ocupan, escogeremos un área de una pletina  $A_{pletina.r}$  y posteriormente corregiremos su valor con la *tabla 4*.

$$b'_{pletina.r} := 20mm$$

$$N_{pletinas.r} := 5$$

$$A_{pletina.r} := \frac{A_{cu.r.min}}{N_{pletinas.r}} = 19.33 \cdot mm^2$$

Corregiremos el valor del ancho de ranura y ancho de diente como hicimos en el devanado de inducido.

$$b'_{r.r} := b'_{pletina.r} + 2 \cdot b_{a.r} = 20.3 \cdot mm$$

$$b'_{d.r} := \tau_{r.r} - b'_{r.r}$$

Acudiendo a la *tabla 4* escogeremos el área y altura real de cada pletina  $A'_{pletina.r}$  y  $h_{pletina.r}$  respectivamente.

$$A'_{pletina.r} := 19.9mm^2$$

$$h_{pletina.r} := 1mm$$

$$A_{cu.r} := N_{pletinas.r} \cdot A'_{pletina.r} = 99.5 \cdot mm^2$$

Debemos comprobar que la densidad de corriente  $\delta_r$  tenga un valor razonable, apoyándonos en la *tabla 1* que utilizamos para determinar el valor de la densidad de corriente en el estator podemos estimar que entre  $6$  y  $15 A/mm^2$  serán aceptables.

$$\delta_r := \frac{I_f}{A'_{pletina.r} \cdot N_{pletinas.r}} = 12.4 \cdot \frac{A}{mm^2}$$

### **13. Profundidad de las ranuras de rotor**

Una vez conocidas las dimensiones reales de las pletinas podemos estimar la profundidad de las ranuras que resultará:

$$h_{r.r} := N_{pletinas.r} \cdot N_c \cdot (2b_{a.r} + h_{pletina.r}) = 63 \cdot mm$$

También debemos tener en cuenta el espacio del cierre de ranura como hicimos en el estator,  $h_{2.r.r}$ .

$$h_{2.r.r} := 15mm$$



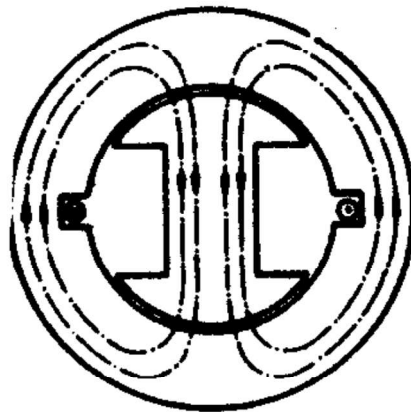
## **14. Pérdidas de potencia**

### **14.1 Pérdidas en el hierro**

Las pérdidas en el hierro de las máquinas eléctricas se suelen admitir constantes, porque, en la gran mayoría de los casos, la frecuencia es constante y el flujo magnético (y por tanto la densidad de flujo máxima) varía muy poco entre vacío y plena carga. Su valor coincide prácticamente con la medida de potencia consumida en el ensayo de vacío cuando éste se efectúa a la tensión nominal o asignada.

Para la determinación de dichas pérdidas debemos conocer el flujo magnético y la densidad de flujo que atraviesan la culata. En el caso del flujo podemos asumir que solo la mitad del flujo del entrehierro atravesará la culata ya que la mitad de este se cierra por dentro y la otra mitad por fuera (ver *ilustración 18*), y en el caso de la densidad de flujo será un valor más elevado comprendido entre  $1,1$  y  $1,5T$ , y algo más elevado en los dientes, entre  $1,5$  y  $2T$  (ver *tabla 8*). Véase referencia [1]

Utilizaremos la expresión del flujo magnético para determinar el área de la culata (transversal), y con la longitud axial del estator, ya conocida, seremos capaces de estimar un volumen y por lo tanto un peso de nuestro estator.



*Ilustración 18. Líneas de flujo.*

$$\frac{\Phi_m}{2} = B_{culata} A_{culata}$$

	Flux density $B/T$			
	Asynchronous machines	Salient-pole synchronous machines	Nonsalient-pole synchronous machines	DC machines
Air gap	0.7–0.90 ( $\hat{B}_{\delta 1}$ )	0.85–1.05 ( $\hat{B}_{\delta 1}$ )	0.8–1.05 ( $\hat{B}_{\delta 1}$ )	0.6–1.1 ( $B_{\max}$ )
Stator yoke	1.4–1.7 (2)	1.0–1.5	1.1–1.5	1.1–1.5
Tooth	1.4–2.1 (stator)	1.6–2.0	1.5–2.0	1.6–2.0
(apparent maximum value)	1.5–2.2 (rotor)			(compensating winding) 1.8–2.2 (armature winding)
Rotor yoke	1–1.6 (1.9)	1.0–1.5	1.3–1.6	1.0–1.5
Pole core	—	1.3–1.8	1.1–1.7	1.2–1.7
Commutating poles	—	—	—	1.3

Tabla 8. Valores típicos de inducción  $B_m$ .

Para el cálculo de pérdidas por unidad de masa y masa total de la culata nos apoyaremos en los datos de un fabricante de chapas magnéticas (tabla 9), para así estimar una densidad del material magnético  $\rho_{fe}$ , y las pérdidas de este por unidad de masa  $W/Kg$ .

Nominal Thickness, mm (in.)	Assumed Density, gm/cm <sup>3</sup>	Resistivity, $\Omega\cdot m$ , $\times 10^{-8}$	Maximum Core Loss Watts per kilogram		Maximum Core Loss Watts per pound	
			50 Hz		50 Hz	
			1.5 T	1.7 T	15 kg	17 kg
0.23 (0.009)	7.65	51	0.73	1.10	0.330	0.500
0.27 (0.011)			0.82	1.20	0.370	0.545
0.27 (0.011)			0.85	1.25	0.385	0.565
0.30 (0.012)			0.86	1.25	0.390	0.565
0.30 (0.012)			0.88	1.30	0.400	0.590
0.30 (0.012)			0.92	1.40	0.415	0.635
0.35 (0.014)			1.07	1.55	0.485	0.705

Tabla 9. Datos fabricante de chapas magnéticas.

En nuestro caso se ha escogido una apilación de chapas de  $0,3mm$  de grosor y asumimos una densidad de flujo máxima de  $1,5T$ , con lo que obtendremos unas pérdidas de  $0,88W/Kg$ .

$$B_{culata} := 1.5T$$

$$P_{fe.kg} := 0.88 \frac{W}{kg}$$

$$\rho_{fe} := 7.65 \frac{gm}{cm^3}$$

Nuestra única incógnita es el área, pero al conocer la longitud axial, solo nos falta conocer el grosor de nuestra culata al que denominaremos  $h_{culata}$ .

$$h_{culata} := \frac{\phi_m}{2 \cdot B_{culata} \cdot L_s} = 255.9 \cdot mm$$

Ya podemos calcular el volumen total de la culata  $V_c$  añadiendo el volumen de los dientes  $V_d$ .

$$V_d := N_r \cdot h_{r.s} \cdot b_{d.s} \cdot L_s = 0.455 \cdot m^3$$

$$V_c := \pi \cdot L_s \cdot \left[ \frac{[D + 2(h_{r.s} + h_{2.r.s}) + 2h_{culata}]^2}{4} - \frac{[D + 2(h_{r.s} + h_{2.r.s})]^2}{4} \right] + V_d$$

$$V_c = 4.894 \cdot m^3$$

Luego nuestra masa de la culata y las pérdidas serán:

$$m_c := V_c \cdot \rho_{fe} = 3.744 \times 10^4 \cdot kg$$

$$P_{fe} := m_c \cdot P_{fe.kg} = 32.948 \cdot kW$$

## 14.2 Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre son debidas al efecto Joule tanto en el estator ( $P_{cu.s}$ ) como en el rotor ( $P_{cu.r}$ ) y su cálculo es muy sencillo:

$$P_{cu.s} := 3 \cdot I_n^2 \cdot R_s \cdot T_{trabajo} = 224.433 \cdot kW$$

$$P_{cu.r} := I_f^2 \cdot R_f = 555.318 \cdot kW$$

## 14.3 Pérdidas mecánicas

En cuanto a las pérdidas mecánicas a falta de un cálculo preciso podemos estimarlas como un 4% de la potencia que entra por el eje a nuestra máquina (típicamente de una turbina), esta potencia será la potencia activa que entrega la máquina  $P_n$  más las pérdidas calculadas anteriormente.

$$P_{mec} := 0.04 \cdot (P_n + P_{fe} + P_{cu.s} + P_{cu.r}) = 3232.508 \cdot kW$$

## 14.4 Rendimiento de la máquina

Una vez conocidas todas las pérdidas de nuestro generador podemos determinar el rendimiento global de la máquina  $\eta$  como un cociente entre la potencia entregada y la potencia cedida por el eje desde la turbina.

$$\eta := \frac{P_n}{P_n + P_{fe} + P_{cu.s} + P_{cu.r} + P_{mec}} = 0.952$$

## **16. Solución del problema y conclusiones**

Una vez concluida la simulación nos vemos obligados a comprobar si los resultados obtenidos son aceptables y concuerdan con los valores que debería tener una máquina de estas características.

Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, se ha elaborado una herramienta auxiliar que sirva de ayuda, no se trata de un diseño definitivo sino de valores preeliminares que puedan orientar al usuario a base de prueba y error con el fin de agilizar este proceso. Un diseño real y definitivo incluiría muchas variables que en es simulación no se han tenido en cuenta.

A continuación haremos un breve repaso de la solución propuesta. Comenzaremos analizando el valor de la reactancia síncrona a partir de la *tabla 10* como referencia. Véase referencia 8

	Reactancia síncrona ( $x_d$ )
Turboalternadores	1,2 a 2,5
Alter. polos salientes, con amortiguador	0,8 a 1,2
Alter. polos salientes, sin amortiguador	1,00 a 1,23

*Tabla 9. Valores típicos reactancia síncrona*

$$x_s = 1.429$$

Para un turboalternador como es el caso de estudio resulta un valor aceptable. Lo siguiente que comprobaremos es si la relación entre la reactancia síncrona  $X_s$  y la resistencia de una fase  $R_{s.Trabajo}$  está dentro de los límites aceptables. Como referencia podemos decir que para turboalternadores de rotor liso esta relación es siempre mayor que 80. Para el cálculo de esta relación tendremos en cuenta el efecto pelicular en los conductores (corriente alterna) el cual los hace algo más resistivos, entorno al 25%.

$$\frac{X_s}{1.25 \cdot R_{s.Trabajo}} = 509.219 \frac{I}{\Omega}$$

Nos encontramos con un valor bastante elevado, lo que se debe a haber escogido una densidad de corriente en el estator  $\delta_s$  demasiado baja y por consecuencia un área de conductor  $A_{cu.s}$  algo elevada. La manera de rectificar esta variable si no se considera aceptable sería partiendo de una densidad de corriente más elevada.

Pongamos el ejemplo de haber escogido una densidad mayor (según la *tabla1* los valores típicos están comprendidos entre 4 y 8 A/mm<sup>2</sup>).

$$\delta_{s2} := 8 \frac{A}{mm^2}$$

El mínimo área de cobre  $A_{cu.s.min2}$  sería:

$$A_{cu.s.min2} := \frac{I_n}{\delta_{s2}} = 360.84 \cdot mm^2$$

Y podemos decir que de manera orientativa la resistencia por fase  $R_{s2}$  (teniendo en cuenta la corrección de temperatura y el efecto pelicular) valdrá:

$$R_{s2} := \rho_{cu} \cdot \left( \frac{N_s \cdot L_b}{A_{cu.s.min2}} \right) \cdot \left[ \frac{(234.5 \text{ } ^\circ C + T_{trabajo})}{(234.5 \text{ } ^\circ C + 20 \text{ } ^\circ C)} \right] \cdot 1.25 = 0.015 \cdot \Omega$$

Con lo que obtenemos:

$$\frac{X_s}{R_{s2}} = 374.997 \frac{I}{\Omega}$$

Sigue siendo un valor un poco elevado pero para nada disparatado. Hay que tener en cuenta que el caso de prueba ha sido partiendo de valores típicos y no se han tomado datos de un máquina real, sino estimaciones aceptables.

Una vez comprobada la relación  $X_s/R_{s2}$  haremos un repaso del resto de variables para tener una perspectiva general del modelo propuesto y comprobar los resultados numéricos.

## 16.1 Estator

- **Geometría:**

Longitud de la máquina	$L_S = 400 \cdot cm$
Diámetro interno	$D = 94.05 \cdot cm$
Ranuras por fase y polo	$q = 9$
Número total de ranuras	$N_r = 54$
Paso polar	$\tau_P = 147.73 \cdot cm$
Ancho de ranura	$b'_{r.s} = 27.1 \cdot mm$
Ancho de diente	$b'_{d.s} = 27.6 \cdot mm$
Paso de ranura	$\tau_{r.s} = 54.7 \cdot mm$
Profundidad de ranura	$h_{r.s} = 77 \cdot mm$
Área de ranura	$A_{r.s} = 2086.7 \cdot mm^2$

- **Parámetros eléctricos**

Tensión nominal	$U_n = 20 \cdot kV$
Intensidad nominal	$I_n = 2.887 \cdot kA$
Tensión inducida en cada fase	$E = 11.547 \cdot kV$
Resistencia de una fase	$R_{s.Trabajo} = 0.009 \Omega$
Reactancia síncrona	$x_s = 1.429$

- **Conductores**

Área de cobre de un conductor	$A_{cu.s} = 490 \cdot mm^2$
Ancho de pletina	$b'_{pletina} = 9 \cdot mm$
Área de pletina	$A'_{pletina} = 17.5 \cdot mm^2$
Altura de pletina	$h_{pletina} = 2 \cdot mm$
Longitud de una espira	$L_b = 12.033 \cdot m$

## 16.2 Entrehierro

Entrehierro geométrico	$g = 64.3 \cdot mm$
Entrehierro efectivo	$g_0 = 68.3 \cdot mm$
Densidad de flujo máxima	$B'_m = 0.816 \text{ T}$
Fuerza magnetomotriz	$F_{m.g} = 4.174 \times 10^4 \text{ A}$
Campo magnético	$H_m = 6.496 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$
Flujo máximo	$\Phi_m = 3.071 \text{ Wb}$

## 16.3 Rotor

- **Geometría**

Diámetro	$D_r = 87.62 \cdot cm$
Ranuras por polo	$q_r = 16$
Ancho de ranura	$b'_{r.r} = 20.3 \cdot mm$
Paso de ranura	$\tau_{r.r} = 60.2 \cdot mm$
Profundidad de ranura	$h_{r.r} = 63 \cdot mm$

- **Parámetros eléctricos**

Tensión de excitación	$V_{exc} = 450 \text{ V}$
Corriente de excitación en vacío	$I_{f0} = 565.9 \text{ A}$
Corriente de excitación a plena carga	$I_f = 1234 \text{ A}$
Resistencia	$R_f = 0.365 \Omega$



- **Conductores**

Área de cobre de un conductor	$A_{cu.r} = 99.5 \cdot mm^2$
Ancho de pletina	$b'_{pletina.r} = 20 \cdot mm$
Área de pletina	$A'_{pletina.r} = 19.9 \cdot mm^2$
Altura de pletina	$h_{pletina.r} = 1 \cdot mm$
Longitud de una espira	$L_{cmedia} = 10.844 \cdot m$

Una vez repasados los resultados numéricos el usuario decidirá si debe rectificar el modelo o no.

En el caso de estudio nos encontramos con que los resultados obtenidos son coherentes con lo que se consideran valores típicos de este tipo de máquinas, como puede ser la reactancia de dispersión por unidad, resistencia por unidad, entrehierro geométrico, tensión y corriente de excitación, ancho y paso de ranura, densidad de flujo, flujo magnético y rendimiento. Todo ello a pesar de lo simplificado que ha sido el cálculo y las numerosas cuestiones que no se han tenido en cuenta.

Con esto podemos concluir en que incluso con un procedimiento de cálculo así de sencillo se puede obtener un prediseño bastante realista, el cual puede servir de ayuda para un cálculo más detallado.

## **17. Listado de variables**

$S_n$	Potencia aparente nominal de la máquina [MVA]
$U_n$	Tensión nominal de la máquina (fase-fase) [kV]
$f$	Frecuencia [Hz]
$\cos(\varphi)$	Factor de potencia
$\Omega_1$	Velocidad de sincronismo [r.p.m]
$SCR$	Relación de cortocircuito
$V_{exc}$	Tensión de excitación [V]
$T_{trabajo}$	Temperatura de trabajo [°C]
$I_n$	Intensidad nominal [A]
$P_n$	Potencia nominal [kW]
$T_m$	Par interno de la máquina [kNm]
$p$	Número de pares de polos
$Z_b$	Impedancia base del modelo [ $\Omega$ ]
$D_{max}$	Diámetro máximo de la máquina (consideraciones mecánicas) [m]
$B_m$	Densidad de flujo máxima en el entrehierro [T]
$A_\mu$	Valor eficaz capa lineal de corriente en el inducido [A/m]
$C_0$	Coefficiente de utilización de la máquina
$V_{pris}$	Volumen prismático de la máquina [m <sup>3</sup> ]
$L_s$	Longitud de la máquina [m]
$D$	Diámetro interno del estator [cm]
$\tau_p$	Paso polar [cm]
$\lambda_p$	Relación de esbeltez de polo
$\lambda$	Relación de esbeltez de rotor
$q$	Número de ranuras por fase y por polo del estator
$N_m$	Número de fases
$N_r$	Número de ranuras totales del estator
$N_{s.b}$	Número de espiras por bobina del estator
$N_s$	Número total de espiras en serie por fase del estator
$L_{perif}$	Longitud periférica interna del estator [mm]
$k_{\tau.s}$	Cociente entre ancho de ranura y paso de ranura del estator
$b_{r.s}$	Ancho de ranura del estator [mm]
$b_{d.s}$	Ancho de diente del estator [mm]

$\tau_{r.s}$	Paso de ranura del estator [mm]
$\delta_s$	Densidad de corriente en el estator [A/mm <sup>2</sup> ]
$A_{cu.s.min}$	Sección mínima de cobre de un conductor del estator [mm <sup>2</sup> ]
$U_{test}$	Tensión de ensayo (aislante) [kV]
$\varepsilon_a$	Rigidez dieléctrica del aislante (estator) [kV/mm]
$b_{a.min}$	Ancho mínimo de aislante (estator) [mm]
$U_{impulso}$	Sobretensión de tipo impulso [kV]
$b_a$	Ancho de aislante de los conductores del estator [mm]
$b_{a.total}$	Ancho total de aislante en una ranura del estator [mm]
$b_{pletina}$	Ancho de pletina favorable del estator [mm]
$N_{pletinas}$	Número de pletinas que forman conductor del estator
$A_{pletina}$	Sección de una pletina favorable del estator [mm <sup>2</sup> ]
$b'_{pletina}$	Ancho real de pletina del estator [mm]
$A'_{pletina}$	Sección real de una pletina del estator [mm <sup>2</sup> ]
$h_{pletina}$	Altura real de una pletina del estator [mm]
$A_{cu.s}$	Sección real de cobre de un conductor del estator [mm <sup>2</sup> ]
$b'_{r.s}$	Ancho de ranura del estator corregido [mm]
$b'_{2.r.s}$	Ancho de ranura externo del estator corregido [mm]
$b'_{d.s}$	Ancho de diente del estator corregido [mm]
$b'_{2.d.s}$	Ancho externo de diente del estator corregido [mm]
$h_{r.s}$	Altura de ranura del estator [mm]
$h_{2.r.s}$	Altura de cierre de ranura del estator [mm]
$A_{r.s}$	Sección de una ranura del estator (sin contar el cierre) [mm <sup>2</sup> ]
$k_{paso}$	Acortamiento de paso del estator
$\beta$	Ángulo de acortamiento de paso [°]
$k_p$	Factor de paso
$\gamma_g$	Ángulo geométrico entre ranuras del estator [°]
$\gamma_e$	Ángulo eléctrico entre ranuras del estator [°]
$k_d$	Factor de distribución
$k_w$	Factor de devanado del estator
$E$	Fuerza electromotriz inducida en cada fase [V]
$\Phi_m$	Flujo magnético [Wb]
$B'_m$	Densidad de flujo real [T]

$\rho_{cu}$	Resistividad del cobre [ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ]
$N_{r.b}$	Número de ranuras recorridas por las cabezas de bobina
$N_{d.b}$	Número de dientes recorridos por las cabezas de bobina
$Arco$	Arco recorrido por las cabezas de bobina [mm]
$\alpha$	Ángulo que forman los conductores de las cabezas de bobina [°]
$x$	Saliente de las cabezas de bobina [mm]
$a$	Distancia de media cabeza de bobina [mm]
$L_b$	Longitud de una espira [cm]
$R_{s.b}$	Resistencia de una espira [ $\Omega$ ]
$R_s$	Resistencia de una fase [ $\Omega$ ]
$R_{s.Ttrabajo}$	Resistencia de una fase a $T_{trabajo}$ °C [ $\Omega$ ]
$k_s$	Factor de saturación
$x_s$	Reactancia síncrona [p.u]
$\lambda_{ran}$	Constante de dispersión en las ranuras
$X_{ran}$	Reactancia de dispersión en las ranuras [ $\Omega$ ]
$L_{cb}$	Longitud de las cabezas de bobina [cm]
$X_{cb}$	Reactancia de dispersión en las cabezas de bobina [ $\Omega$ ]
$X_\sigma$	Reactancia de dispersión [ $\Omega$ ]
$x_\sigma$	Reactancia de dispersión por unidad [p.u]
$\mu_0$	Permeabilidad magnética del vacío [ $\text{N/A}^2$ ]
$g$	Entrehierro geométrico [mm]
$k_{cl}$	Factor de Carter del estator
$D_r$	Diámetro del rotor [mm]
$k_r$	Porcentaje ranurado del rotor
$q_r$	Número de ranuras por polo del rotor
$k_{\tau,r}$	Cociente entre ancho de ranura y paso de ranura del rotor
$b_{r,r}$	Ancho de ranura del rotor [mm]
$b_{d,r}$	Ancho de diente del rotor [mm]
$\tau_{r,r}$	Paso de ranura del rotor [mm]
$k_{c2}$	Factor de Carter del rotor
$g_0$	Entrehierro efectivo [mm]
$H_m$	Campo magnético [A/m]
$F_{m,g}$	Fuerza magnetomotriz en el entrehierro [A/vuelta]

$F_{m.f}$	Fuerza magnetomotriz en el devanado de excitación [A/vuelta]
$\gamma_{g.r}$	Ángulo geométrico entre ranuras del rotor [°]
$\gamma_{e.r}$	Ángulo eléctrico entre ranuras del rotor [°]
$k_{w.f}$	Factor de devanado del rotor
$N_c$	Número de conductores por ranura del rotor
$N_f$	Número de espiras totales en el rotor
$I_{f0}$	Intensidad de excitación en vacío [A]
$U$	Vector tensión de fase
$\varphi$	Ángulo formado entre tensión de fase e intensidad nominal [°]
$X_s$	Reactancia síncrona
$iX_s J$	Caída de tensión en la reactancia síncrona
$E_f$	Fuerza electromotriz inducida a plena carga
$\theta$	Ángulo formado entre $E_f$ y $U$ [°]
$I_f$	Corriente de excitación a plena carga [A]
$R_f$	Resistencia del devanado de excitación [ $\Omega$ ]
$R_{f.b}$	Resistencia de una espira del rotor a la temperatura de trabajo [ $\Omega$ ]
$R_{f.b.20^\circ C}$	Resistencia de una espira del rotor a 20°C [ $\Omega$ ]
$Arco_{liso}$	Arco sin ranurar recorrido por una bobina del rotor [mm]
$N_{pc}$	Número de pares de conductores que pasan por un arco liso
$L_c$	Longitud de cada espira del rotor [m]
$L_{c.media}$	Longitud media de las espiras del rotor [m]
$A_{cu.r.min}$	Sección mínima de cobre de un conductor del rotor [mm <sup>2</sup> ]
$b_{a.r}$	Ancho de aislante del rotor [mm]
$b_{pletina.r}$	Ancho de pletina del rotor favorable [mm]
$b'_{pletina.r}$	Ancho real de pletina del rotor [mm]
$N_{pletinas.r}$	Número de pletinas del rotor
$A_{pletina.r}$	Sección de pletina de rotor favorable [mm <sup>2</sup> ]
$b'_{r.r}$	Ancho de ranura del rotor corregido [mm]
$b'_{d.r}$	Ancho de diente del rotor corregido [mm]
$A'_{pletina.r}$	Sección de pletina de rotor [mm <sup>2</sup> ]
$h_{pletina.r}$	Altura de pletina del rotor [mm]

$A_{cu.r}$	Sección real de cobre de un conductor del rotor [mm <sup>2</sup> ]
$h_{r,r}$	Altura de ranura del rotor [mm]
$h_{2,r,r}$	Altura de cierre de ranura del rotor [mm]
$\delta_r$	Densidad de corriente en el rotor [A/mm <sup>2</sup> ]
$B_{culata}$	Densidad de flujo en la culata [T]
$P_{fe.kg}$	Pérdidas en el hierro por unidad de masa [W/kg]
$\rho_{fe}$	Densidad del material magnético [g/cm <sup>3</sup> ]
$h_{culata}$	Grosor de la culata [mm]
$V_d$	Volumen de los dientes del estator [m <sup>3</sup> ]
$V_c$	Volumen total de la culata [m <sup>3</sup> ]
$m_c$	Masa de la culata [kg]
$P_{fe}$	Pérdidas en el hierro [kW]
$P_{cu.s}$	Pérdidas en el cobre del estator [kW]
$P_{cu.r}$	Pérdidas en el cobre del rotor [kW]
$P_{mec}$	Pérdidas mecánicas [kW]
$\eta$	Rendimiento global de la máquina

## **18. Valoración económica del proyecto**

En este apartado estimaremos un valor económico de la herramienta software. No se trata de un análisis de los costes de fabricación de la máquina, este proyecto ha sido creado con la intención de crear una herramienta no de satisfacer un solo diseño en concreto ya que debido a la inmensa variedad de materiales y procesos de fabricación existentes, dependerá del usuario cuales utilizar. Para un análisis económico orientativo de la herramienta software debemos tener en cuenta factores como :

- Coste de ingeniero por hora y tiempo empleado
- Pago licencia de Mathcad
- Amortización de los materiales usados (ordenador)
- Tutorías

Coste de ingeniero por hora  $C_h$  (euros/hora) y tiempo empleado  $t$  (horas):

$$C_h := 30$$

$$t := 190$$

Coste de la licencia Mathcad  $C_l$  (euros):

$$C_l := 149.9$$

Coste de material usado  $C_m$  (euros), es casi despreciable, para su determinación partiremos del coste del ordenador y su amortización anual calculada a partir de su porcentaje de uso.

El coste del ordenador  $C_c$  (euros), en mi caso se trata de un Macbook Pro, es de 1499 euros según el precio de mercado actual.

La amortización anual  $A_a$  (euros) la calculamos multiplicando el precio del ordenador por el coeficiente de amortización, que para este caso según la ley 27/2014 del impuesto de sociedades es como máximo 25% del valor del mismo. Ajustaremos esta amortización anual en función del uso, utilizando el coeficiente de uso  $U_c$  (%).

$$C_c := 1499$$

$$A_a := 0.25 \cdot C_c = 374.8$$

$$U_c := 10$$

$$C_m := A_a \cdot \frac{U_c}{100} = 37.5$$

Coste de las tutorías  $C_{tut}$  (euros). Habrá que considerar el coste hora de un ingeniero senior  $C_i$  (euros), y el tiempo empleado en las tutorías  $t_t$  (horas):

$$C_i := 90$$

$$t_t := 15$$

$$C_{tut} := C_i \cdot t_t = 1350$$

También contaremos con que el usuario deberá adquirir una licencia Mathcad para el uso de esta herramienta en el cálculo del coste total del proyecto  $C_t$  (euros).

$$C_t := C_h \cdot t + 2 \cdot C_l + C_m + C_{tut} = 7387.3$$



## **19. Bibliografía**

- 1; Vaagn L Zakarian, Mark J Kaiser (1999) *Applied Mathematical Modelling*, Vol 23,1 " *Computer-aided design of synchronous generators with comb rotors*"
- 2; Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova (2008) *Design of rotating electrical machines*, John Wiley & Sons, Ltd.
- 3; Rafael Sanjurjo Navarro (1989) *Máquinas eléctricas*, McGraw-Hill
- 4; Christof Sumereder, Michael Muhr, Bernhard Körbler (2003) *Life time management of power transformers*, 17th International Conference on Electricity Distribution
- 5; Miguel Ángel Rodríguez Pozueta (2015) *Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas*, Universidad de Cantabria, Dpto Ingeniería Eléctrica y Energética
- 6; Greg C.Stone, Edward A.Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani (2004) *Electrical insulation for rotating machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, IEEE Press Series on Power Engineering, Mohamed E. El-Hawary, Series Editor
- 7; Germar Muller, Karl Vogt, Bernd Ponick (2012) *Berechnung elektrischer Maschinen*, Wiley Vch
- 8; M. Cortes (1977) *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas*, Ed.Téc.Asoc. Barcelona
- 9; A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans (1990) *Electric Machinery. 5th edition*, Blacklick, Ohio, U.S.A. McGraw-Hill College
- 10; Thomas A. Lipo (2004) *Introduction to AC Machine Design*, University of Wisconsin
- 11; O.I. Okoro, M.U. Agu, E. Chinkuni (2006) *Pacific Journal of Science and Technology*, Vol 7, 1 "Basic Principles and Functions of Electrical Machines"
- 12; Stephen J. Chapman (2003) *Electric Machinery Fundamentals, 4th ed.* McGraw-Hill

- 13; Jimmie J. Cathey (2001) *Electrical Machines. Analysis & Design applying MATLAB*, McGraw-Hill
- 14; Brian John Chalmers, Alan Charles Williamson (1991) *A.C. machines: electromagnetics and design*, Research studies press, Taunton
- 15; M. V. Deshpande (2010) *Design and Testing of Electrical Machines*, PHI Learning